

Atte Piispanen

HAJAUTETUN PIENTUOTANNON VAIKUTUS KÄYTTÖTOIMINTAAN

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Diplomityö
Lokakuu 2019

TIIVISTELMÄ

Atte Piispanen: Hajautetun pientuotannon vaikutus käyttötoimintaan
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Lokakuu 2019

Jakeluverkkoon liitetyn hajautetun pientuotannon määrä on kasvanut viime vuosina voimakkaasti. Työssä on selvitetty hajautetun pientuotannon vaikutuksia käyttötoimintaan ensisijaisesti sähkö- ja sähkötyöturvallisuuden näkökulmasta. Pääasiallisesti tarkastelun kohteeksi on rajattu aurinkosähköjärjestelmät, joiden osuus verkkoon liitetystä hajautetusta mikro- ja pientuotannosta on lähes 99%. Tarkastelu on tehty alaan liittyvää kirjallisuutta, asiantuntijahaastatteluita sekä simuloituja hyödyntäen

Työhön sisältyvää pientuotannon vaikutusten tarkastelu on selvitysten perusteella rajattu koskemaan tilanteita, joissa yhteys syöttävän verkkoon häviää tarkasteltavaa verkon osaa syöttävän kytkinlaitteen aukeamisen seurauksena. Tätä tilannetta voidaan soveltaa jakeluverkossa suoritettaviin suunniteltuihin töihin sekä yksinkertaistaen myös verkon vikatilanteisiin liittyen. Kyseisissä tilanteissa verkkoon liitetyt hajautetuksi tuotannoksi luokiteltavat voimalaitokset voivat tiettyissä tilanteissa aiheuttaa takasyöttövaaran, mikäli ne jäävät ei-toivotusti syöttämään saarekettä.

Diplomityön ensisijaisena tarkoituksena on mikro- ja pientuotantokohteiden vaikutusten selvittäminen eri käyttötilanteissa ja verkkotyypeissä. Toisena työn päätavoitteena on saatujen tulosten soveltuvuuden arviointi verkkoyhtiön käytönsuunnittelun kehittämiseen ensisijaisesti kytkentäsuunnittelun näkökulmasta

Työhön liittyvät simuloinnit on toteutettu hyödyntäen PSCAD 4.6.3 Professional -ohjelmistoa, joka on tarkoitettu graafisen käyttöliittymän avulla mallinnettavien piirien tarkasteluun. Ohjelmiston avulla voidaan tarkastella sähköverkossa tapahtuvia transienttitilanteita aikatasossa. Simuloinneissa käytetty verkkomalli koostuu katkaisijakomponentin kautta syötetystä jakeluverkosta sekä voimalaitosmallista, joka voidaan sijoittaa käyttäjän haluamien jakelumuuntajien pienjänniteverkon pisteisiin. Simuloinneissa mallinnettava, invertterin avulla jakeluverkkoon liitetty voimalaitos on kytketty pienjännitteiseen jakeluverkkoon ja sen verkkoon syöttämään nimellistehoa voidaan säätää vapaasti. Diplomityöhön liittyvien simulointien perusteella ei-toivotun saarekkeen syntyminen on rajoitetusti mahdollista käytetyssä jakeluverkkomallissa.

Työn tulosten valossa esille nousee selkeä lisätutkimustarve jakeluverkon kanssa rinnankäyvien invertterien todellisesta käyttäytymisestä LOM-tilanteissa. Verkkoon liitettyjen pientuotantokohteiden määrän kasvun voidaan olettaa jatkuvan laitteistojen hankintakustannusten laskiessa ja tietoisuuden lisääntyessä. Lisäksi esimerkiksi sähköautojen kaksisuuntaisten latauslaitteistojen yleistymisen lisää verkkoon liitettyjen voimalaitoksiksi luokiteltavien kohteiden määrää. Simulointiympäristössä saadut tulokset tukevat kirjallisuuden esittämää tietoa verkkoon liitettyjen invertterien toiminnasta LOM-tilanteissa, mutta havainnoille tulisi saada varmistus jatkotutkimuksessa. Diplomityössä suositetaan ei-toivotun saarekkeen syntymahdollisuutta tarkastelevien kenttäkokeiden suorittamista todellisessa jakeluverkossa.

Avainsanat: Hajautettu sähköntuotanto, pientuotanto, käyttötoiminta, kytkentäsuunnittelu, ei-toivottu saarekekäyttö

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Faculty of Information Technology and Communication Sciences
Atte Piispanen: The Impact of Distributed Small-Scale Generation on Network Operations
Master's Thesis
Tampere University
Electrical Engineering
October 2019

The amount of grid-connected distributed small-scale generation has increased significantly during last lately. The Impact of Distributed Small-Scale Generation on Network Operations has been researched via safety at electrical work. Grid-tied solar power systems have been selected as main aspect because almost 99 percent of distributed small-scale energy production are based on solar power. The research of this thesis is based on literature, expert interviews and computer simulations.

The study of impacts of distributed small-scale generation has been defined to cover situations in which connection to feeding network is lost as a result of opening of circuit breaker or a disconnector. The situation described can be applied to planned switching work in networks and even in fault situations when simplified. In these situations of unintentional islanding distributed generation may cause danger of rear feed.

The main purpose of this thesis was to discover impacts of micro-scale and small-scale generation in different topologies and network models. These impacts are secondary researched and evaluated to be used in development of operation planning in distribution system operator.

Simulations of this thesis has been implemented with PSCAD 4.6.3 Professional software which has been designed for building and simulating graphical grid models. PSCAD can be used for transient simulations in power systems. The model created for this thesis consist of a feeder-fed medium voltage network, inverter-based, grid tied generator unit and low voltage networks fed via distribution transformers. The generator unit is connected to low voltage network and its' rated power can be adjusted for different simulation situations. The simulations in grid model used showed that unintentional islanding is possible in some situations.

Results of this thesis lead to an explicit need of further research related to behavior of grid-tied small-scale generators in LOM situations. The amount of grid-tied small-scale generators can be expected to grow while investment costs are descending, and knowledge is increasing. In addition, two-way charging stations electric vehicles increase the amount of grid-tied generation units. Simulation-based results support information based on literature and it is recommended to verify the results in further research. Field tests implemented in actual medium and low voltage network are recommended.

Keywords: Distributed generation, small-scale generation, network operation, switching planning, unintentional islanding

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Elenia Oy:n Verkon käyttö -tiimissä vuosien 2018 ja 2019 aikana. Työ aloitettiin Tampereen teknillisen yliopiston Sähköenergiatekniikan laboratoriossa ja työ valmistui Tampereen yliopiston Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunnan sähkötekniikan yksikössä vuonna 2019. Työn aihe on ollut mielenkiintoinen, koska hajautetun pientuotannon määrän jatkuva kasvu ja alaan liittyvien standardien muutos ovat vaatineet jatkuvaa huomiota.

Haluan kiittää Diplomityön ohjausryhmään kuuluneita Heikki Paanasta, Vesa Hälvää, Teemu Suvelaa sekä Selina Sihvosta sekä myös muita kollegoitani avusta työhön liittyen. Lisäksi haluan kiittää työn tarkastajana toiminutta professori Sami Repoa korvaamattomasta avusta ja näkemyksen laajentamisesta työn aihepiiriin liittyen. Suuri kiitos kuuluu myös Vaasan yliopistossa työskentelevälle Kimmo Kauhaniemelle, jonka kautta sain käyttööni simuloinneissa hyödynnetyn invertterin PSCAD-mallin.

Lopuksi haluan kiittää ystäviäni ja läheisiäni kannustuksesta sekä välillä myös painostuksesta työn valmiiksi saattamiseksi myös hetkinä, jolloin kirjoittaminen on tuntunut haastavalta.

Tampereella 4.10.2019

Atte Piispanen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	4
2.	TOIMINTAYMPÄRISTÖ	6
2.1	Sähkönjakelujärjestelmä ja sen komponentit	6
2.2	Pien- ja mikrotuotannon määrittelyminen	8
2.3	Hajautettu tuotanto osana sähkönjakelujärjestelmää	9
2.3.1	Pientuulivoima	10
2.3.2	Aurinkovoima	11
2.3.3	Pienvesivoima	13
2.3.4	Muut voimalatyypit	14
2.4	Hajautettu tuotanto Elenian verkossa	14
2.5	Hajautettu tuotanto Suomessa	16
2.6	Käyttötoiminta	18
2.7	Verkossa suoritettavat työt	20
2.7.1	Jännitteettömät työt jakeluverkossa	21
2.7.2	Jännitetyt työt jakeluverkossa	22
2.7.3	Sähkö- ja sähkötyöturvallisuus	23
2.7.4	Tuotannon huomioon käyttäytymisessä, nykytilanne	23
2.7.5	Tuotantoasiakkaiden kontaktointi suunniteltuihin töihin liittyen ..	24
3.	HAJAUTETUN TUOTANNON AIHEUTTAMAT VAATIMUKSET	26
3.1	Tuotantolaitoksen liittäminen verkkoon	26
3.2	Tuotantokohteiden dokumentaatio	27
3.3	Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset	32
3.4	Suojausvaatimukset	35
3.4.1	Oikosulkuvirrat	38
3.4.2	Suojauksen sokaistuminen	38
3.4.3	Epäselektiivinen laukaisu	40
3.4.4	Ei-toivottu saarekekäyttö	41
3.4.5	Jälleenkytkentätilanteet	43
3.4.6	Maasulkutilanteet	44
4.	SIMULOINTIYMPÄRISTÖN MÄÄRITTELY	45
4.1	Loss of mains -tilanteiden ominaispiirteet	45
4.2	Simuloitavan verkon topologia	47
4.3	Simuloitavan verkon PSCAD-malli	47
4.3.1	Jakeluverkon malli	47
4.3.2	Invertterin malli	50
5.	HAJAUTETUN VERKKOON AIHEUTTAMAT ILMIÖT ERI VERKKOMALLEISSA	53
5.1	Ideaalinen verkkomalli	54
5.2	Ilmajohdoverkkomalli häviöt huomioon	57

5.3	Maakaapeloitu verkkomalli häviöt huomioimatta.....	60
5.4	Johto-osien pätö- ja loistehohäviöt huomioiva verkkomalli	62
6.	TULOSTEN ARVIOINTI JA JATKOTUTKIMUSTARPEET	64
7.	YHTEENVETO	67
	LÄHTEET	69
	LIITE A: TUOTANNON YLEISTIETOLOMAKE.....	73
	LIITE B: SIMULOINTITULOKSET, IDEAALINEN VERKKOMALLI	75
	LIITE C: SIMULOINTITULOKSET, ILMAJOHTOVERKKOMALLI HÄVIÖT HUOMIOIMATTA.....	86
	LIITE D: SIMULOINTITULOKSET, MAAKAPELOITU VERKKOMALLI HÄVIÖT HUOMIOIMATTA	96
	LIITE E: SIMULOINTITULOKSET, MAAKAPELOITU VERKKOMALLI HÄVIÖT HUOMIOIMATTA.....	106

LYHENTEET JA MERKINNÄT

C	Kapasitanssi
L	Induktanssi
P_{GEN}	Generaattorin pätöteho
P_{J01}	Katkaisijan J01 verkkoon syöttämä pätöteho
P_{INV}	Invertterin pätöteho
P_{LOAD}	Kuorman pätöteho
S_N	Nimellinen näennäisteho
U	Jännite
U_1/U_2	Muuntajan muuntosuhde
V_{PH}	Vaihejännite
Q_{GEN}	Generaattorin verkkoon syöttämä loisteho
Q_{J01}	Katkaisijan J01 verkkoon syöttämä loisteho
Q_{INV}	Invertterin loisteho
Q_{LOAD}	Kuorman loisteho
AJK	Aikajälleenkytkentä
EVY	Eroonkytkennän viestiyhteys
CHP	Combined Heat and Power
DMS	Distribution Management System
KJ	Keskijännite
LOM	Los of Mains
NDZ	Non-Detection Zone
PJ	Pienjännite
PJK	Pikajälleenkytkentä
pu	Power Unit
ROCOF	Rate of Change of Frequency
RTU	Remote Terminal Unit
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
VJV	Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset

1. JOHDANTO

Verkkoon liitetyn hajautetun mikro- ja pientuotannon määrä on viime vuosina kasvanut voimakkaasti, minkä seurauksena Jakeluverkkoyhtiöissä on noussut esille tarve tarkastella hajautetun tuotannon vaikutusta jakeluverkossa suoritettaviin töihin. Jakeluverkkoyhtiöiden tulee kyetä tunnistamaan hajautetun tuotannon aiheuttamat riskit ja muutokset toimintaympäristössä. Vuoden 2019 toukokuuhun mennessä Elenian jakeluverkkoon on liitetty yli 2800 pientuotannoksi luokiteltavaa aurinkosähköjärjestelmää. Edellisenä kahdena vuonna Elenian verkkoon liitettyjen uusien hajautetuksi mikro- ja pientuotannoksi luokiteltavien voimalaitosten määrä on ollut noin 900 kappaletta vuositasolla (Elenia 2019a).

Diplomityölle määritettiin kolme selkeää päätavoitetta, joista ensimmäinen on mikro- ja pientuotantokohteiden vaikutusten selvittäminen eri käyttötilanteissa ja verkkotyypeissä. Vaikutuksia tarkastellaan ensisijaisesti työturvallisuuden näkökulmasta ei-toivotun saarekkeen syntymahdollisuuksien arvioinnin kautta. Pääasialliseksi tarkastelun kohteeksi on rajattu aurinkosähköjärjestelmät, joiden osuus verkkoon liitetystä hajautetusta mikro- ja pientuotannosta on lähes 99%. Tarkastelu on tehty alaan liittyvää kirjallisuutta, asiantuntijahaastatteluita sekä simulointeja hyödyntäen. Toisena työn päätavoitteena on saatujen tulosten soveltuvuuden arviointi Elenian käytönsuunnittelun kehittämiseen ensisijaisesti kytkentäsuunnittelun näkökulmasta. Käytönsuunnittelussa laaditaan käyttökeskukseen toteutettavaksi vuositasolla noin 5000 kytkentäohjelmaa, jotka liittyvät verkon kunnonossapitoon, korjaukseen sekä verkonrakentamiseen. Kolmanneksi päätavoitteeksi asetettiin ST-poolille diplomityön muodossa tehtävän tutkimusaiheen taustoituksen laatiminen liittyen hajautettuun pientuotantoon.

Verkkoon liitettyjen tuotantokohteiden rajaaminen mikro- ja pientuotantokohteisiin ei ole eri standardeihin perustuen yksiselitteistä, minkä vuoksi diplomityön alussa on suoritettu tarkastelu pien- ja mikrotuotannoksi luokiteltavien kohteiden nimellistehoon liittyen. Energiateollisuuden määritelmän mukaisesti pientuotannon nimellistehon ylärajaksi on määritetty 1 MVA. Standardissa SFS-EN 50438 mikrotuotanto on ensisijaisesti määritetty nimellisteholtaan enintään 11 kVA suuruiseksi tuotantolaitteistoksi. Tässä diplomityössä keskitytään käsittelemään hajautettua energiantuotantoa jakeluverkon kanssa rinnankäyvien sähköntuotantolaitteistojen näkökulmasta. Tulevaisuudessa yksittäisten tuotantokohteiden nimellistehot tulevat todennäköisesti kasvamaan teknologisen kehityksen ja laitteistojen hankintakustannusten pienentymisen seurauksena.

Toisessa ja kolmannessa luvussa on tarkasteltu sähköverkkoja toimintaympäristönä sekä hajautetun pientuotannon verkoille asettamia vaatimuksia. Pientuotantoa on tarkasteltu turvallisuusnäkökulmasta verkossa tehtävien töiden sekä mahdollisen asiakkaille aiheutuvan vaaran kautta. Keskeiseksi tarkastelun kohteeksi työssä on määritetty ei-toivotut

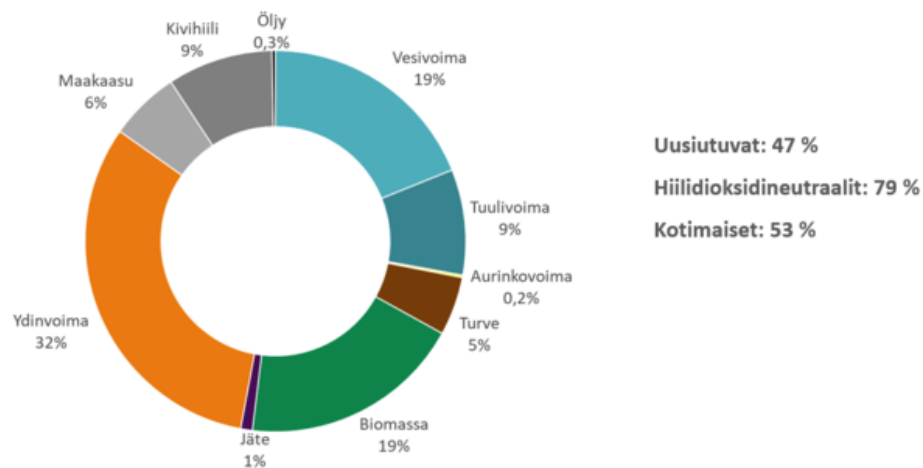
saarekekäyttötilanteet, joissa syöttävän verkon jännite häviää verkon kytkinlaitteen toiminnan seurauksena ja voimalaitos jää pitämään yllä saarekettä jännitteettömäksi oletetussa verkon osassa.

Neljännessä luvussa on määritelty ja muodostettu simulointiympäristö, jossa ei-toivotun saarekekäyttötilanteen syntymahdollisuuksia voidaan tarkastella ideaalisesti tai todellisten johto-osien mukaisesti mallinnetussa keskijänniteverkossa. Keskijänniteverkon malli koostuu verkkoa syöttävästä sähköasemakatkaisijasta, keskijänniteverkon johto-osista ja jakelumuuntajien syöttämistä muuntopiireistä, joihin voidaan liittää haluttu määrä invertterin avulla verkon kanssa rinnan käyviä pientuotannoksi luokiteltavia voimalaitoksia ja niitä vastaavia säädettäviä kuormia. Eri verkkomalleilla suoritettujen simulointien tulokset on koottu viidenteen lukuun ja tuloksia on tarkasteltu työn tavoitteiden sekä luotettavuuden kannalta kuudennessa luvussa. Lopuksi yhteenvedossa on esitetty työn keskeisimmät tulokset ja arvioitu työlle asetettujen tavoitteiden täyttymistä.

2. TOIMINTAYMPÄRISTÖ

Tässä luvussa käsitellään sähköjakelujärjestelmää sen rakenteen, käyttötoiminnan sekä sähköntuotannon näkökulmista. Alaluvuissa on tarkoitus kuvata sähköjakelujärjestelmä kokonaisuutena, johon liitettyjen mikro- ja pientuotantokohteiden tarkastelu voidaan perustaa.

Suomen sähköntuotanto perustuu useaan eri tuotantomuotoon. Merkittävimmät tuotantomuodot ovat ydinvoima, vesivoima, biomassa, kivihiili, maakaasu. Kuvassa 1 on esitetty Suomen sähköntuotanto energialähteittäin vuonna 2018. Sähkön kokonaistuotanto Suomessa vuonna 2018 oli yhteensä 67 TWh. (Energiateollisuus 2019a)



Kuva 1. Sähköntuotanto Suomessa energialähteittäin vuonna 2018. (Energiateollisuus 2019a)

Etenkin hajautetun mikro- ja pientuotannon osuus on kasvanut merkittävästi teknologian kehittymisen sekä laitteistojen hankintakustannusten halpenemisen myötä. Etenkin aurinkosähköjärjestelmien kohdalla on havaittavissa trendi-ilmiön kaltaista laitteistojen yleistymistä, mikä voidaan todentaa tarkastelemalla laitteistojen investointikustannuksia verrattuna takaisinmaksuaikaan. Luvuissa 2.4 ja 2.5 on selostettu hajautetun pientuotannon ja etenkin pienen kokoluokan aurinkosähköjärjestelmien lukumäärän sekä nimellistehon kasvua jakeluverkossa.

2.1 Sähköjakelujärjestelmä ja sen komponentit

Sähköjakelujärjestelmän tarkoituksena on siirtää sähkönsiirtoverkkoon tai sähköjakeluverkkoon liitettyjen voimalaitosten tuottama sähkö kuluttajille. Sähköjakelujärjestelmä muodostuu suurjännitteisestä alueverkosta (110 kV ja 45 kV), sähköasemista (110/20 kV tai 45/20 kV), keskijänniteverkosta (20 kV), jakelumuuntamoista (20/0,4 kV)

sekä pienjänniteverkosta (0,4 kV). Perinteisesti suurin osa jakeluverkosta on ilmajohto-verkkoa. Näitä verkon osia kutsutaan jakelujärjestelmän primäärikomponenteiksi. (Lakervi & Partanen 2008) Uuden sähkömarkkinalain seurauksena sähköverkko on suunniteltava ja rakennettava siten, ettei sähköverkossa esiinny luonnonilmiöiden seurauksena yli 6 tuntia kestäviä jakelun keskeytyksiä asemakaava-alueella ja yli 36 tuntia kestäviä jakelun keskeytyksiä asemakaava-alueen ulkopuolella. (Sähkömarkkinalaki 588/2013) Sähkömarkkinalain tiukentuneiden toimitusvarmuusvaatimuksien seurauksena sähköverkkojen maakaapelointi on yleistynyt, mikä aiheuttaa muutosta jakeluverkkoihin toimintaympäristönä.

Elenia Oy:llä on 110 kV alueverkkoa 1151 km, 45 kV alueverkkoa 365 km, 20 kV keskijänniteverkkoa 25 210 km sekä 0,4 kV pienjänniteverkkoa 43 450 km. Yhtiön sähköverkossa on 136 sähköasemaa ja yli 24 000 jakelumuuntamo (Elenia 2019b). Tässä diplomityössä keskitytään pienjännitteiseen jakeluverkkoon liitettyjen hajautetuksi mikro- ja pientuotannoksi luokiteltavien komponenttien verkkoon aiheuttamien ilmiöiden tarkasteluun verkossa suoritettavien töiden osalta.

Jakelujärjestelmään kuuluu lisäksi niin sanottuja sekundäärikomponentteja, jotka muodostavat toisiojärjestelmän. Näitä järjestelmiä ja laitteita ovat sähköasemilla sekä sijaitsevat suojareleet ja apujännitejärjestelmät, valvomossa sijaitsevat käytönvalvonta- ja käytöntukijärjestelmät, tiedonsiirto ja viestintäjärjestelmät sekä muut tietojärjestelmät, joita ovat esimerkiksi verkkotietojärjestelmä, asiakastietojärjestelmä sekä materiaalinhallintajärjestelmät. Sähköverkon komponenttien käyttöiät ovat pitkiä ja primäärikomponenttien pitoajat vaihtelevat kolmestakymmenestä viiteenkymmeneen vuoteen. Sekundäärikomponenttien pitoajat ovat teknologian kehityksen ja sovellusten elinkaaren pituuden vuoksi huomattavasti lyhyempiä, kymmenestä kahteenkymmeneen vuotta. (Lakervi & Partanen 2008) Lisääntyneen maakaapeloinnin seurauksena verkossa käytössä olevien komponenttien erot teknologian ja iän osalta korostuvat entisestään. Myös sekundäärikomponenteiksi luettavien älykkäiden sähkömittarien avulla verkosta saadaan lähes reaaliaikaista tietoa, jota voidaan tulevaisuudessa hyödyntää sähkön kulutusmittauksen lisäksi teknologistuvan asiakaskunnan tarpeiden, kuten reaaliaikaisen valvonnan, kulutusjoustop ja sähköntuotannon sovellutusten, täyttämiseen (Työ- ja elinkeinoministeriö 2018).

Sähköasemat ovat jakeluverkon tärkeimpiä yksittäisiä toiminnallisia osia, joille suurin osa sähköverkon automaatiosta ja releisiin perustuvista suojaustoiminnoista on sijoitettu. Sähköaseman mitoituksessa ja suunnittelussa on huomioitu sähköntoimituksen laatuolosuhteet. Sähköasemat koostuvat ne alueverkkoon liittävästä suurjännitekytkinlaitoksesta (110 kV tai 45 kV) mittamuuntajineen, yhdestä tai useammasta päämuuntajasta, keskijänniteverkkoa syöttävästä keskijännitekytkinlaitoksesta sekä apujännitejärjestelmästä käytöntukitoimintoineen. (Lakervi & Partanen 2008)

Teho siirretään sähköaseman keskijännitekytkinlaitoksen läpi päämuuntajalta kiskostoa pitkin keskijännitteiseen jakeluverkkoon (Lakervi & Partanen 2008). Jakeluverkkoja käytetään yleensä säteittäisinä ja säteittäin käytetyssä verkossa vikojen rajoittaminen on tarvittavan teknologian puolesta yksinkertaisempaa ja taloudellisempaa sekä oikosulkuvirratt pienempiä. Suojausten toteuttaminen on yksinkertaisempaa säteittäin käytetyssä kuin silmukoidussa verkossa. (Lakervi & Partanen 2008). Lisääntynyt verkkoon liitetyn hajaautetun pientuotannon määrä vaikuttaa tehon sekä vikavirtojen suuruuteen ja siirtosuuntaan jakeluverkoissa, mikä voi tietyissä tilanteissa aiheuttaa haasteita suojauksen toiminnalle. Vikatilanteissa hajautetun tuotannon kohteet voivat syöttää jakeluverkossa vikavirtaa kohti vikapaikkaa syöttävään sähköasemaan nähden eri suunnasta. (Repo et al. 2005) Syöttävän verkon suojausasettelut sekä sulakekoot tulee tarkastaa liitettäessä uusi tuotantolaitos verkkoon (Lehto 2009).

Verkon kytkentätilannetta on mahdollista ohjata kytkinlaitteilla, joita ovat katkaisijat ja erottimet. Kytkinlaitteiden tilaa voidaan muuttaa ohjaamalla niitä manuaalisesti tai kauko-ohjatusti valvomosta käsin. Erottimen tehtävänä on muodostaa luotettava avausväli erotettavan virtapiirin ja muun verkon välille tai saada laitoksen osa jännitteettömäksi turvallisen työskentelyn mahdollistamiseksi. Keskijänniteverkon nopeassa vianrajauksessa voidaan hyödyntää kauko-ohjattavia kytkinlaitteita. (Elovaara & Haarla 2011)

2.2 Pien- ja mikrotuotannon määritteleminen

Sähkömarkkinaissa määritetään pienimuotoiseksi sähköntuotannoksi yhden tai useamman voimalaitoksen muodostama kokonaisuus, jonka nimellisteho on yhteensä enintään 2 MVA. Pienimuotoisen sähköntuotannon liittämisestä sähköverkkoon ei saa sisällyttää sähköverkon vahvistamisesta johtuvia kustannuksia. (Sähkömarkkinalaki 588/2013) Lakia tulkitaan siten, että vuodessa enintään 800 000 kilowattituntia tuottavat sähkön pientuottajat eivät ole velvollisia maksamaan tuotetusta sähköenergiasta sähköveroa, mikäli tuotettu sähkö kulutetaan itse. Sähkö, joka on tuotettu enintään 100 kVA:n nimellistehoisella generaattorilla, ei edellytä verovelvolliseksi rekisteröitymistä sähköntuotantoon liittyen. (Suomen ympäristökeskus 2015)

Lainsäädännön perusteella ei voida määrittää yksiselitteistä määritelmää pientuotannolle, vaan raja on usein määritettävä tapauskohtaisesti voimalaitostyypistä, vuosituotannosta tai laitoksen nimellistehosta riippuen. Käytännössä tuotantolaitoksen nimellistehoa kuvaavat arvot ovat usein ratkaisevassa asemassa hajautetun ja pienimuotoisen energiantuotannon määrittelyssä. (Suomen ympäristökeskus 2015)

Voimassa olevista standardeista sekä Energiateollisuuden julkaisemista ohjeistuksista voidaan saada lainsäädännöstä poikkeavia tai sitä täydentäviä näkökulmia Energiateollisuus määrittelee mikrotuotannon verkkoon liittämistä koskevassa ohjeessaan standardin SFS-EN 50438 mukaisesti mikrotuotantolaitokseksi sähköntuotantolaitoksen, joka on ensisijaisesti tarkoitettu tuottamaan sähköä

kulutuskohteeseen. Edellä mainitun standardin mukaisesti mikrogeneraattori liitetään verkkoon asiakkaan kulutuspaikassa ensisijaisesti enintään 3x16 ampeerin sulakkeilla. Sulakekoon perusteella määritelty mikrotuotantokohteen yläraja vastaa noin 11 kilowattia. Ohjetta voidaan kuitenkin soveltaa myös liitettäessä verkkoon enintään 100 kVA nimellistehoisia tuotantolaitoksia. (Energiateollisuus 2016b)

Tässä työssä on päädytty noudattamaan mikro- ja pientuotannon rajaamisen perusteena lisäksi Energiateollisuuden käytäntöjä sekä ohjeita pien- ja mikrotuotannon liittämistä sähköverkkoon, koska Energiateollisuuden ohjeet ovat yleisesti kuluttajien saatavilla ja niihin perustuvat myös sähköyhtiöiden käyttämät verkkopalveluehdot sekä menettelykäytännöt. Energiateollisuuden ohjeita on yleisesti saatavilla myös sähköverkkoyhtiöiden, kuten Elenian verkkosivuilla. Ohjeet perustuvat osin vanhentuneisiin standardeihin, mutta niitä ei ole vielä päivitetty vastaamaan uutta standardia SFS 50549-1 (SFS-EN 50549-1 2019).

Energiateollisuuden julkaisema ohjeistus mikrotuotantokohteen liittämistä jakeluverkkoon on todennäköisesti poistumassa sellaisenaan käytöstä ja tulee todennäköisesti korvautumaan Energiateollisuuden sähköntuotantolaitoksen verkkoon liittämistä käsittelevällä ohjeella (Energiateollisuus 2016c) sekä sen liitteellä 1 (Energiateollisuus 2016d), joka käsittelee nimellisteholtaan alle 100 kVA suuruisen sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon. Energiateollisuus käyttää pientuotannon nimellistehon enimmäisarvona 1 MW:n tehoa, johon perustuen myös verkkoon liitettyjen pientuotantolaitteistojen tilastoinnit tehdään verkkoyhtiöiltä kerättävien tietojen avulla (Minkkinen 2019). Tässä diplomityössä sähköenergiaa tuottavan pientuotantokohteen nimellistehon ylärajaksi määritetään voimassaolevasta lainsäädännöstä poiketen arvo 1 MW. Mikrotuotantolaitteiston nimellistehon ylärajaksi on määritetty standardiin SFS-EN 50438 perustuen arvo 11 kW.

Simulointitulosten perusteella voidaan selvittää tuotantokohteen nimellistehon ja esimerkiksi tuotantomuodon vaikutus sen sähköverkkoon aiheuttamiin ilmiöihin eri kytkentätilanteissa. Simulointien perusteella voidaan edelleen määrittää, millaisia ilmiöitä tarkasteltavat tuotantokohteet voivat aiheuttaa keski- ja pienjänniteverkossa suoritettaviin jännitteettömiin ja jännitteellisiin töihin ja vikakeskeytyksiin. Samalla voidaan verrata, onko edellä määritetty mikrotuotantokohteen nimellistehoraja sopiva

2.3 Hajautettu tuotanto osana sähkönjakelujärjestelmää

Kehittyvä tietoisuus ympäristöstä ja tavoitteet fossiilisten päästöjen määrän pienentämiseksi ohjaavat energiantuotantoa kohti ympäristöystävällisempiä menetelmiä. Esimerkiksi EU:n tavoitteena on vuoteen 2030 mennessä vähentää kasvihuonekaasupäästöjen määrää 40 prosentilla verrattuna 1990-luvun tasoon. Tavoitteena on lisäksi, että vuosikymmenen alkuun mennessä vähintään 27 prosenttia energiasta on tuotettu uusiutuvia

energianlähteitä käyttäen. (Euroopan unioni 2019) Hajautettu tuotanto tarjoaa mahdollisuuksia edellä mainittujen tavoitteiden saavuttamiseen ja hajautetun tuotannon määrän lisääntymisen on havaittu aiheuttavan tutkimustarvetta verkkoyhtiön käyttötoimintaan liittyen.

Hajautettua sähköenergian tuottamiseen tarkoitettua energiantuotantoa voidaan pitää laaja-alaisena kokonaisuutena, joka koostuu useista toisiinsa limittyneistä kokonaisuuksista. Hajautettua energiantuotantoa on usein pidetty synonyyminä sähkön ja lämmön pienimuotoiselle tuotannolle. Hajautettuun tuotantoon liittyy kiinteästi paikallisuusnäkökulma niin käytettyjen resurssien kuin tuotetun energian hyödyntämiseen liittyen. Hajautetun energiantuotannon laitokset tuottavat omistajalleen usein merkittävää lisäarvoa niiden sijainnista johtuen, mutta hajautetusti tuotetun energian täydellisen hyödyntämisen voidaan katsoa olevan riippuvainen tuotantolaitoksen kytkemisestä jakeluverkkostoon, kun ylimääräinen energia voidaan hyödyntää paikallisesti. (Suomen ympäristökeskus 2015)

Perinteisesti suuremmat, keskitettyä energiantuotantoa edustavat voimalaitokset on kytketty siirtoverkkoon, mutta monet hajautetuksi tuotannoksi luokiteltavat tuotantolaitokset on kytketty jakeluverkkoon. Hajautetun tuotantolaitoksen kytkeminen jakeluverkkoon on usein ainoa järkevä tapa laitosten nimellistehon ja sijoituspaikan aiheuttamien vaatimusten seurauksena. (Teodorescu et al. 2010) Tämän työn aiheeseen liittyvien rajausten seurauksena tarkastelussa keskitytään jakeluverkkoon kytkettyjen tuotantolaitosten aiheuttamien ilmiöiden tarkasteluun. Vanhan tyyppistä jakeluverkkoa ei ole suunniteltu siten, että siihen olisi tarkoitus kytkeä suuria määriä hajautettua tuotantoa, mikä aiheuttaa lisäksi omat haasteensa. Käynnissä oleva jakeluverkon laajamittainen maakaapelointi mahdollistaa järkevästi suunniteltuna hajautetun tuotannon vaativan kapasiteetin rakentamisen.

Hajautettujen tuotantolaitosten määrän nopea kasvu aiheuttaa jakeluverkossa tapahtuvan tehonsiirron muuttumisen yksisuuntaisesta monisuuntaiseksi. Jakeluverkossa siirtyvää tehoa ei voida hajautettujen tuotantolaitosten yleistymisen johdosta enää mitata ainoastaan sähköasemien mittauksia käyttäen. (Teodorescu et al. 2010) Luvussa 2.4 on myöhemmin esitetty määrällisiä ja laadullisia tietoja Elenian verkkoon kytketyistä pientuotantokohteista.

2.3.1 Pientuulivoima

Tuulivoimaloiden voidaan karkeasti kuvata koostuvat generaattorin välityksellä yhteydessä olevista mekaanisesta ja sähköisestä järjestelmästä. Mekaaninen järjestelmä siirtää tuulen liike-energian generaattorin akselille ja sähköinen järjestelmä tarvittaessa muuntaa sähköenergian sähkön laatuvaatimukset täyttävään muotoon, ennen sähköverkkoon syöttämistä. (Teodorescu et al. 2010)

Suomeen asennetun yksittäisen tuulivoimalan keskiteho oli Tuulivoimayhdistyksen julkaiseman selvityksen mukaan vuonna 2017 3,3 MW. Tuulivoimalla tuotettiin Suomessa vuoden 2017 aikana 4,8 TWh sähköenergiaa tuulivoimakapasiteetin ollessa kokonaisuudessaan 2044 MW. (Suomen tuulivoimayhdistys 2018) Tuulivoimalat on usein asennettu tuulipuistokokonaisuuksiksi, joiden sähkön erillistuotannon keskiteho on Energiaviraston voimalaitosrekisterin mukaan noin 17,8 MW tuotannon maksimin vaihdellessa välillä 1–117,3 MW (Energiavirasto 2019a). Tuulivoimalaitokset ovat keskitehonsa vuoksi pääsääntöisesti sellaisia, että ne on kytketty keskijännitteiseen jakeluverkkoon tai siirtoverkkoon suurina tuulipuistoina. Kuluttajakäyttöön soveltuvia pienen teholuokan tuulivoimaloita käytetään pääosin kohteissa, jotka ovat erillään sähköverkosta, eikä niitä ole kytketty merkittäviä määriä esimerkiksi Elenian verkkoon.

Suomen ympäristökeskuksen vuonna 2015 tekemän hajautetun energiantuotannon tilaa käsittelevän selvityksen perusteella Suomessa käytössä olevat pientuulivoimalat ovat teholtaan vähäisempiä kuin teollisen mittakaavan energiantuotantoon, usein tuulipuistokokonaisuuksiksi asennettavat tuulivoimalat. Selvityksessä käytetyn määritelmän mukaan pientuulivoimaloiden potkurin pinta-ala on alle 200 neliometriä, mikä vastaa käytännössä nimellisteholtaan alle 50 kW:n tuulivoimalaa. (Suomen ympäristökeskus 2015)

Pientuulivoima voidaan jakaa neljään eri luokkaan sen käyttötavan ja tyyppillisen laitteiston mukaan:

1. alle 1 kW: mökkituotanto ja akkujen latauslaitteet
2. alle 5 kW: liikerakennukset ja taajama-asunnot
3. 5...50 kW: suuret yritykset ja maatalous
4. muutamia kilowatteja: telecom-käyttö. (Suomen ympäristökeskus 2015)

Selvityksen mukaan luokkaan yksi kuuluvia laitteistoja toimitettiin vuositason sadasta kahteensataan kappaletta. Luokkaan kaksi ja neljä kuuluvia laitteistoja toimitettiin vuositason noin kymmenen kappaletta kutakin. Luokkaan kolme kuuluvia suuremman mittakaavan pientuulivoimajärjestelmiä toimitettiin vuodessa ainoastaan yksittäisiä kappaleita. Lopputulemana pientuulivoiman suhteen todetaan laitteistojen verrattain vähäisten toimitusmäärien kertovan, että etenkin jakeluverkkoon liitettävää pientuulivoimaa hyödynnetään vain vähän. (Suomen ympäristökeskus 2015)

2.3.2 Aurinkovoima

Aurinkosähkön tuotantoa määrittävä voimakas vuorokaudenajoista ja vuodenaajoista riippuva kausiluontoinen vaihtelu aiheuttaa haasteita tuotetun energian hyödyntämiselle. Koska sähköenergiaa ei teknistaloudellisista syistä johtuen ole mahdollista varastoida suuressa mittakaavassa, sähköverkkoon liitettyjen aurinkosähköjärjestelmien avulla tuotettu sähköenergia edellyttää mahdollisuutta säädellä energian kokonaistuotantoa muiden

energianlähteiden avulla tehotasapainon ylläpitämiseksi. Aurinkosähköjärjestelmät koostuvat halutun jännite- ja tehotason mukaisella tavalla useista rinnan ja sarjaan kytketyistä aurinkopaneeleista. (Suomen ympäristökeskus 2015)

Aurinkosähköjärjestelmien hinnat ovat yleisesti laskeneet 2000-luvun alkupuolelta lähtien. Motivan selvitysten mukaan aurinkopaneelien hinnat ovat laskeneet kuluvan vuosikymmenen aikana jopa 80 prosenttia. Aurinkosähköjärjestelmän hankintaan liittyvä investointi koostuu kuitenkin aurinkopaneelien lisäksi myös muista merkittävistä kustannuksista, joita ovat invertteri, säätölaitteet, tarvikkeet, suunnittelu sekä asennustyö. Mainituista investoinnin osa-alueista johtuen itse aurinkosähköjärjestelmien hinnat eivät ole laskeneet yhtä jyrkästi kuin itse aurinkopaneelien. Pientalokokoluokassa tyypillisesti asennettavan 2 kW_p: aurinkosähköjärjestelmän hankintakustannukset asennettuna ovat kuluttajille noin 5000...6000 euroa. (Motiva 2017)

Energiaviraston vuonna 2018 julkaiseman tiedotteen mukaan aurinkosähkön tuotantokapasiteetti 2,5 –kertaistui vuoden 2017 aikana. Vuoden 2017 lopussa Suomen sähköverkkoon liitetyn aurinkosähkötuotannon kokonaiskapasiteetti oli arviolta 70 MW verkkoon liitetyn pientuotannon kokonaiskapasiteetin ollessa noin 178 MW. (Energiavirasto 2018) Tuotantokapasiteetin määrän voimakkaan kasvun voidaan olettaa olevan seurausta aurinkosähköjärjestelmien hintojen laskusta sekä aurinkosähköjärjestelmiin liittyvän tietoisuuden ja saatavuuden parantumisesta. Aurinkosähköjärjestelmiin liittyvien investointien kannattavuus paranee verkkoyhtiöiden siirtohintojen kasvun myötä. Ylen artikkelin mukaan monen verkkoyhtiön siirtohinnat ovat nousseet vuoden 2013 hintatasosta jopa 50 prosenttia (Yleisradio 2018).

Aurinkosähkösovellukset ja –järjestelmät voidaan Suomen ympäristökeskuksen selvityksen mukaan jakaa viiteen kategoriaan:

1. liikuteltavat laitteet, kuten kannettavat akkujen latauslaitteet
2. sähköverkon ulkopuoliset laitteet, kuten kesämökkijärjestelmät
3. sähköverkkoon liitetyt pientalojärjestelmät
4. suurten kiinteistöjen ja yritysten järjestelmät, jotka ovat pääosin sähköverkkoon kytkettyjä
5. teollisuuskokoluokan aurinkosähkövoimalaitokset, jotka ovat verkkoon kytkettyjä. (Suomen ympäristökeskus 2015)

Luokan 3 pientalojärjestelmien tyypillinen nimellisteho on selvityksen mukaan 2...5 kW ja yritysjärjestelmien nimellisteho 10...300 kW. Suomen alueella saadaan tuotettua vuosisitasolla noin 1000 kWh sähköenergiaa asennettua aurinkosähköjärjestelmän nimellistehoa mittaavaa kilowattia kohden. (Suomen ympäristökeskus 2015) Nykyisin asennettavien yksittäisten aurinkosähköjärjestelmien tyypillisten nimellistehojen voidaan olettaa hieman nousseen järjestelmien asennukseen liittyvien investointikustannusten laskettua. Järjestelmien suunnittelun yhteydessä tehtävä tehotarpeeseen perustuva mitoitus rajoittaa

kuitenkin esimerkiksi kotitalouksien sähkönkäyttöpaikoille liitettävien aurinkosähköjärjestelmien taloudellisesti kannattavaa enimmäistehoa.

Aurinkosähköjärjestelmä liitetään verkon kanssa rinnankyväksi käyttäen invertteriä, joka muuntaa auringon säteilyn sisältämän energian seurauksena syntyvän tasavirran verkon vaatimukset täyttäväksi vaihtovirraksi. Invertterit voivat olla yksittäisten aurinkopaneelien järjestelmissä paneeleihin integroituja tai useiden paneelien järjestelmissä keskitettyjä, mikä tarkoittaa sitä, että paneeleita on kytketty järjestelmässä sarjaan tai rinnan. Aurinkosähköjärjestelmien kehitys on järjestelmien korkeasta hintatasosta johtuen keskittynyt energiantuotannon taloudellisuuden parantamiseen. (Teodorescu et al. 2010)

2.3.3 Pienvesivoima

Suomen nimellisteholtaan alle 10 MW:n suuruiseksi luokiteltavan pienvesivoiman tuotantokapasiteetti on Suomessa toimivan pienvesivoimayhdistyksen mukaan ollut vuonna 2009 1043 MW. Pienvesivoimalaitoksiksi luokiteltavia yksiköitä on ollut vuonna 2009 käytössä yhteensä 152 kappaletta, joista 73 kappaletta on nimellisteholtaan alle 1 MW:n suuruisia. Pienvesivoiman historia juontaa juurensa myllytoimintaan sekä myöhemmin 1950-luvulla tapahtuneeseen sodanjälkeisen yhteiskunnan sähköistykseen. (Pienvesivoimayhdistys 2014) Suomen vesivoiman kokonaiskapasiteetti on noin 3100 MW, joten pienvesivoiman osuus vesivoiman tuotantokapasiteetista on noin kolmannes (Energiateollisuus 2019b).

Suomen ympäristökeskuksen selvityksessään käyttämät vesivoimaloiden nimellistehoon perustuvat luokittelut noudattelevat vesivoimayhdistyksen Pienvesivoimaoppaan vastaavia luokitteluita. Esitettyä vesivoimaloiden teholuokittelua ja tehokapasiteettia tarkasteltaessa on syytä huomioda, että pienvesivoimalaitosten nimellistehon yläraja 10 MW on merkittävästi Energiateollisuuden raportoinnissa käyttämää yhden megawatin tehorajaa korkeampi. Vesivoimalat voidaan jaotella voimalan nimellistehon perusteella kolmeen kategoriaan:

1. alle 1 MW: minivesivoima
2. 1...10 MW: pienvesivoima
3. yli 10 MW: suurvesivoima (Suomen ympäristökeskus 2015).

Pien- ja minivesivoimaan liittyvän tilastoinnin katsotaan ympäristökeskuksen selvityksessä olevan rajallista. Haasteita todetaan löytyvän myös hyödynnetyn sekä hyödyntämättömän vesivoimapotentialin arvioinnissa. Karkeasti voidaan arvioida, että pienvesivoimapotentialista on hyödynnetty tällä hetkellä noin puolet. Kuitenkin vain osa hyödyntämättömästä vesivoimapotentialista olisi teknistaloudellisen kannattavuuden näkökulmasta valjastettavissa. Lisäksi vesistöjen suojelulliset sekä muihin ympäristövaikutuksiin liittyvät seikat hankaloittavat uusien vesivoimalaitosten perustamista. Vanhojen ve-

sivoimalaitosten kunnostaminen ja palauttaminen käyttöön onkin nähty potentiaalisimmaksi keinoksi pienvesivoiman tuotantokapasiteetin lisäämistä ajatellen. (Suomen ympäristökeskus 2015)

2.3.4 Muut voimalatyypit

Suomen ympäristökeskuksen selvityksessä nostetaan hajautetun sähköntuotannon kannalta lisäksi esille pien-CHP-laitokset sekä polttokennoihin perustuvat laitokset. Erilaisiin polttoprosesseihin perustuvat yhdistelmälaitokset eli CHP-laitokset tuottavat lämpöenergiaa, joka voidaan jalostaa edelleen sähköenergiaksi generaattoreilla. Polttoprosessissa käytetään usein biomassasta valmistettuja tai peräisin olevia kiinteitä, nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita. Myös fossiilisiin polttoaineisiin perustuvat kaasua tai nestemäistä polttoainetta käyttävät voimalaitostoteutukset ovat mahdollisia. (Suomen ympäristökeskus 2015)

Polttokennot ovat sähkökemiallisia laitteita, joiden avulla polttoaineen sekä hapettimen kemiallinen energia muunnetaan sähköksi ja lämmöksi ilman varsinaista palamistapahtumaa. Polttokennossa toiselle elektrodille syötettävä polttoaine, esimerkiksi vety tai maa-kaasu reagoi toiselle elektrodille syötettävän hapen tai ilman kanssa. Polttokennoteknologiat eivät ole vielä merkittävästi yleistyneet sähköntuotannossa. (Suomen ympäristökeskus 2015)

Myös energiavarastoja voidaan pitää verkkoon liitettyinä hajautetun sähköntuotannon kohteina. Tulevaisuudessa esimerkiksi kaksisuuntaiseen tehonsiirtoon soveltuvat sähköautojen latausasemat sekä aurinkosähköjärjestelmien yhteyteen asennettavat akustot tullevat lisääntymään akkuteknologian kuluttajahintojen laskiessa.

Elenia ja Fortum ovat ilmoittaneet 29.5.2018 julkaistussa lehdistötiedotteessa tehneensä aiesopimuksen Pohjois-Pirkanmaalla sijaitsevaan Kuruun kytkettävästä akkuteknologiaan perustuvasta sähkövarastosta. Sähkövaraston on tarkoitus toimia osana Fortumin sähköjärjestelmän reservimarkkinoita. Sähkövarastoa on tarkoitus hyödyntää myös asiakkaiden kokemien sähkökatkojen lyhentämiseen. Akustolla on mahdollista syöttää yli sataa asiakasta saarekkeessa usean tunnin ajan. (Elenia 2018) Yritysten omistamat sähkövarastot ovat nimellisteholtaan merkittäviä pientuotannoksi luokiteltavia kohteita, joita voidaan olettaa liitettävän verkkoon tulevaisuudessa lisääntyvissä määrin.

2.4 Hajautettu tuotanto Elenian verkossa

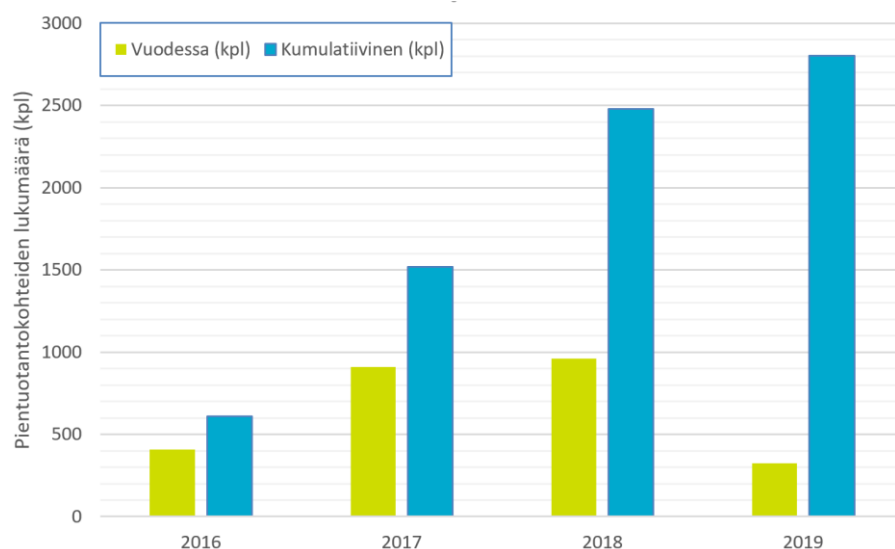
Pientuotantokohteiden lukumäärän muutokset noudattelevat luvussa 2.3 aiemmin kuvatuille tuotantotyypeille ominaista kehitystä. On selkeästi havaittavissa, että aurinkosähköjärjestelmät ovat tällä hetkellä markkinoita hallitseva teknologia verkkoon liitettävien pientuotantolaitteistojen osalta. Taulukossa 1 on esitetty Elenian verkkoon toukokuuhun

2019 mennessä liitetyt pientuotantokohteet tuotantotyypeittäin sekä kunkin tuotantotyyppin yhteenlaskettu teho megawatteina. Pientuotantokohteisiin liittyvä raportointi perustuu Energiategollisuuden käyttävään 1 MW:n nimellistehorajaan, jonka perusteella taulukossa esitetyt tiedot on noudettu verkkotietojärjestelmän tietokannasta.

Taulukko 1. Elenian verkkoon toukokuuhun 2019 mennessä liitetyt pientuotantokohteet. (Elenia 2019a)

Tuotantomuoto	Lukumäärä [kpl]	Nimellisteho [MW]
Aurinko	2767	16,1
Tuuli	18	1,8
Bio	7	1,1
Vesi	11	3,2
Diesel	0	0
Muut	1	0
Yhteensä	2804	22,2

Taulukosta 1 voidaan lukea, että Elenian verkkoon on vuoden 2019 toukokuuhun mennessä kytketty yhteensä 2767 aurinkosähköjärjestelmää. Aurinkosähköjärjestelmien lukumäärä on merkittävästi suurempi muun tyyppisten jakeluverkkoon liitettyjen tuotantolaitteistojen lukumäärään verrattuna. Taulukosta on tuotantokohteiden kappalemääriä ja tuotantomuodon yhteenlaskettua nimellistehoa tarkastelemalla havaittavissa myös, että yksittäisten Tuuli- ja vesivoimaloiden nimellistehot ovat huomattavasti suurempia kuin aurinkovoimaloiden. Kuvassa 2 on esitetty Elenian verkkoon liitettyjen pientuotantokohteiden lukumäärän kehitys vuodesta 2016 vuoden 2019 toukokuun alkuun.



Kuva 2. Elenian jakeluverkkoon liitettyjen pientuotantokohteiden määrän kehitys vuodesta 2016 alkaen. (Elenia 2019a)

Kuvasta 2 voidaan todeta, että pientuotantokohteiden lukumäärän kasvu on ollut voimakasta vuodesta 2016 alkaen. Vuosina 2017 sekä 2018 Elenian jakeluverkkoon on liitetty yli 900 uutta pientuotantokohdetta. Verkkotietojärjestelmän tietokannasta noudettujen tietojen perusteella pientuotantokohteiden nimellistehon keskiarvo on 7,9 kW ja mediaani 3,5 kW (Elenia 2019a). Pientuotantokohteiden nimellistehojen mediaanin voidaan todeta noudattelevan varsin hyvin luvussa 7.2 tarkasteltua Suomen ympäristökeskuksen selvitystä hajautettuun tuotantoon liittyen.

2.5 Hajautettu tuotanto Suomessa

Energiavirasto on julkaissut kesäkuussa 2018 alustavat tilastot vuoden 2017 lopussa sähköjakeluverkkoon liitetyn pientuotannon kokonaismääristä tuotantomuodoittain. Energiaviraston käyttämän luokittelun mukaisesti pientuotantokohteiden nimellistehon ylärajaksi on määritetty arvo 1 MW. Taulukossa 2 on esitetty sähköjakeluverkkoon liitettyjen pientuotantokohteiden arvioidut yhteenlasketut nimellistehot tuotantomuodoittain vuoden 2017 lopussa. Vertailuarvoksi taulukkoon on lisätty vastaavat arvot vuoden 2016 lopusta. (Energiavirasto 2018)

Taulukko 2. Suomen sähköjakeluverkkoon vuosien 2016 ja 2017 lopussa liitettyjen pientuotantokohteiden yhteenlasketut nimellistehot tuotantomuodoittain. (Energiavirasto 2018)

Tuotantomuoto	Nimellisteho [MW]	Nimellisteho [MW]
	31.12.2016	31.12.2017
Aurinko	27,2	66,2
Tuuli	15,5	17,5
Bio	15,3	16,3
Vesi	34,2	36,2
Diesel	37,4	38,2
Muut	2,8	3,3
Yhteensä	132,4	177,7

Taulukosta 2 voidaan todeta, että sähköjakeluverkkoon liitettyjen pientuotannoksi laskettavien aurinkosähköjärjestelmien kapasiteetti on 2,5-kertaistunut luvussa esitetyn 2.3.2 mukaisesti. Samalla muiden sähköjakeluverkkoon liitettyjen pientuotantomuotojen kokonaistuotantokapasiteetti on säilynyt lähes muuttumattomana. Energiavirasto on ennustanut aurinkosähkön pientuotannon kapasiteetin ylittävän 100 MW:n rajapyykin vuoden 2018 aikana. (Energiavirasto 2018)

Määrätyille sähköntuotantomuodoille myönnetään tukea syöttötariffijärjestelmän mukaisesti, mikäli tuotantomuotona on metsähakevoimala, tuulivoimala, biokaasuvoimala tai puupolttoainevoimala. Tuen suuruus vaihtelee tuotantomuodosta riippuen ja sitä voidaan myöntää, mikäli tuotantoteho ylittää sille asetetun vähimmäisarvon. Tuotantohankkeisiin

voidaan myöntää lisäksi investointitukea. (Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta 30.12.2010/1396) Syöttötariffijärjestelmää ei sovelleta uusien tuuli-voimaloiden osalta 1.11.2017 ja uusien biokaasu- ja puupolttoainevoimaloiden osalta 1.1.2019. Metsähakevoimaloita voidaan hyväksyä syöttötariffijärjestelmään 1.2.2021 asti. Syöttötariffia maksetaan 12 vuoden ajan siitä, kun oikeus syöttötariffiin alkaa. (Energiavirasto 2019b) Sähköntuotantoon kohdistuvat syöttötariffijärjestelmän tuet eivät vaikuta merkittävästi tällä hetkellä asennettavien yleisimpien mikro- ja pientuotantolaitteistojen eli aurinkosähköjärjestelmiin liittyviin investointeihin. Sulkeutuvan syöttötariffijärjestelmän korvaajaksi on perustettu preemiojärjestelmä, joka perustuu teknologianeutraaliin kilpailutukseen (Energiavirasto 2019c).

Kotitaloudet ovat oikeutettuja viidenkymmenen prosentin kotitalousvähennykseen ennakoperintäkisteriin merkityn yrityksen työsuorituksesta, jollaiseksi myös sähköntuotantolaitteiston asennustyö luetaan (Verohallinto 2019). Yritykset ovat oikeutettuja Business Finlandin myöntämään uusiutuvan energian investointitukeen, jonka suuruus vaihtelee tuotantomuodosta riippuen kymmenestä kolmeenkymmeneen prosenttiin investoinnin minimisumman ollessa kymmenentuhatta euroa (Business Finland 2019). Maatilat ovat oikeutettuja uusiutuvan energian rakentamisinvestointeihin liittyvään investointitukeen, jonka suuruus on neljäkymmentä prosenttia investoinnin arvonlisäverottomasta kokonaisarvosta. ELY-keskusten myöntämän investointituen suuruus on vähintään 7000 euroa, jolloin minimi-investoinnin suuruus on 18 000 euroa. (Ruokavirasto 2019) Investointituella on merkittävä vaikutus hajautetun tuotannon investointien toteutettavuuteen ja kannattavuuteen yritystoiminnan, kaupan ja teollisuuden mittakaavassa.

Työ- ja elinkeinoministeriön älyverkkotyöryhmän loppuraportin mukaan seuraavan sukupolven äly- eli AMR-mittarit tullaan asentamaan 2020-luvulla ja osa jopa ennen tätä ajankohtaa. Älymittareilla voidaan seurata asiakkaan kokeman sähkönjakelun laatua ja mahdollistaa asiakkaan oman sähkötuotannon myynti markkinoille uudenlaisia palveluita ja palveluntarjoajia hyödyntäen. Raportissa nostetaan esille kulutusjoustoon liittyvät toiminnallisuudet. Älyverkkotyöryhmä tilasi Pöyryltä selvityksen seuraavan sukupolven älymittareiden vähimmäisvaatimuksista. Mittareihin ehdotetaan sisällytettäväksi kuormanohjaustoiminnallisuus asiakkaille, joilla on merkittäviä ohjattavissa olevia kuormia. Työryhmä on lisäksi ehdottanut, että tulevan sukupolven mittareilla tulee kyetä mittaamaan nykyisiä mittareita useampia suureita nykyistä tuntimittausta tiheämmällä syklillä. Seuraavan sukupolven AMR-mittareille esitettävät uudet ominaisuudet mahdollistanevat riittävän pitkälle kehitettyinä mikro- ja pientuotantokohteiden energiantuotannon hyödyntämisen osana energiayhteisöjen ja yksittäisten asiakkaiden kulutusta, tuotantoa ja varastoja suuremmiksi kokonaisuuksiksi yhdistävien aggregaattoreiden toimintaa. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2018)

Älyverkkotyöryhmän loppuraportissa käsitellään lisäksi kiinteistön sisäisiä ja kiinteistörajat ylittäviä energiayhteisöjä, joiden toimintaan pyritään raportin lopputuleman mukaan

suhtautumaan positiivisesti ja joiden toimintaa pyritään edistämään. Nykytilanteessa esimerkiksi kerrostalon yhteisen mittauksen takana sijaitsevan tuotantolaitoksen tuotannosta tulee maksaa siirtomaksu sekä sähkövero, mikäli sähköenergia kulutetaan kiinteistöverkon jakeluverkon liityntäpisteen takaisessa verkossa asiakkaan asunnon mittauksen takaisissa laitteissa. Myös hajautettujen energiayhteisöjen tilannetta käsitellään loppuraportissa. Hajautettu energiayhteisö mahdollistaa energiantuotannon sijoittamisen optimaaliseen paikkaan, joka voi sijaita maantieteellisesti etäällä varsinaisesta kulutuspaikasta. Kehitteillä oleva Datahub mahdollistaisi toisaalla tuotetun sähkön käyttämisen asiakkaan hallinnassa olevalla toisella kulutuspaikalla. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2018)

Etenkin kiinteistörajat ylittävät energiayhteisöt voivat aiheuttaa verkkoyhtiöiden toiminnalle haasteita. Mahdolliset asiakkaiden ja verkkoyhtiön sähkökeskuksille aiheutuvat ei-toivotut takasyötöt jakeluverkon rinnalle rakennettavan yksityisen verkon kautta voivat aiheuttaa vaaratilanteita dokumentoinnin tai asiakkaan laitteiston toiminnan ollessa virheellistä tai määräystenvastaista. Myös sähkön mittaukseen ja tiedonvaihtoon tarvitaan muutoksia energiayhteisöiden toiminnan mahdollistamiseksi. Verkonhaltijoiden tulisi kehittää palvelukonsepteja energiayhteisöjen perustamisen tueksi esimerkiksi uusia mitausratkaisuja toteuttamalla.

2.6 Käyttötoiminta

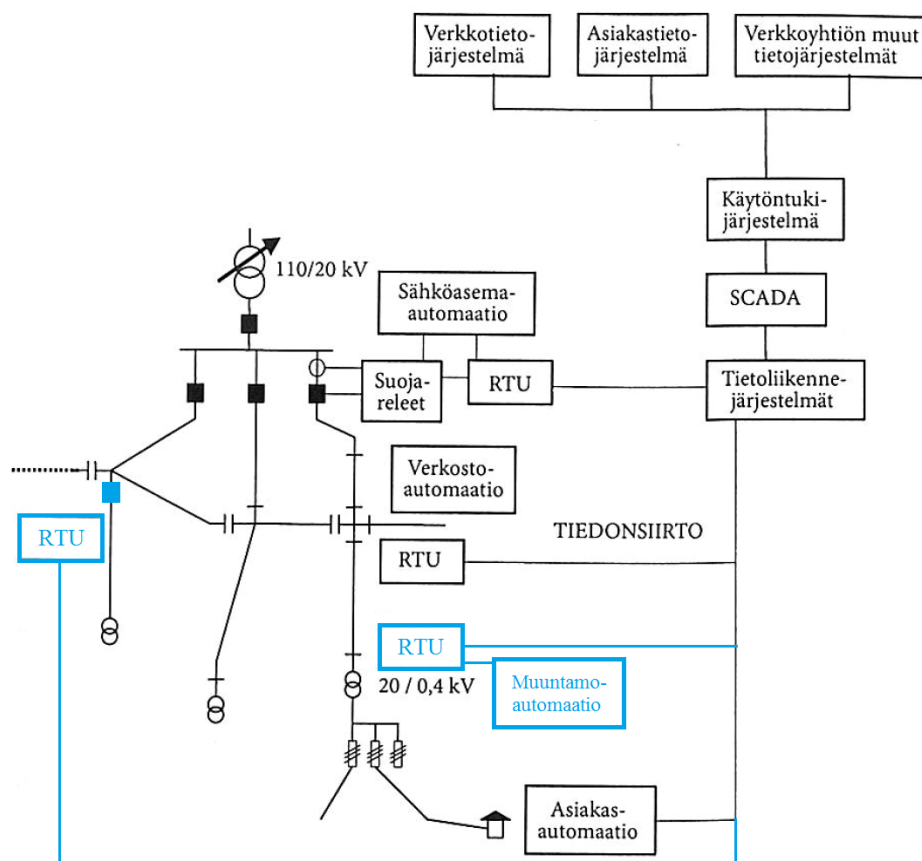
Käyttötoiminta on monipuolinen optimointiprosessi, jonka kokonaistavoitteena on käyttövarmuuden, turvallisuuden, taloudellisuuden, asiakaspalvelun sekä sähkön laadun lyhyen aikavälin ylläpito. Käyttötoimintaa suoritetaan valvomosta, joka voi olla kiinteä käyttökeskus tai käytönvalvojan mukana liikkuva kokonaisuus. Käyttötoiminnan suorittaminen edellyttää reaaliaikaista tietoa verkosta ja sen komponenttien toiminnasta sekä tiloista. Verkkoyhtiön käyttötoiminnasta vastaa käytönjohtaja. (Lakervi & Partanen 2008)

Käyttötoiminnan päätoimintoja ovat käyttötoimintojen suunnittelu, verkon tilan jatkuva seuranta ja ohjaus, häiriötilanteiden hallinta sekä verkkokomponenttien kunnossapidon käytännön toteutus. Käyttötoiminnan suunnitteluun sisältyy muun muassa käyttötoiminnan resurssien ja apuvälineiden jakamisesta päättäminen, vikavirtasuojauksen suunnittelu ja valvonta sekä työkeskeytysten kytkentäsuunnittelu. Käyttötoimintaan olennaisesti kuuluva verkon valvontatyö sisältää verkon suojaus- ja kytkinlaitteiden toiminnan sekä verkon kuormitustilan seurannan. (Lakervi & Partanen 2008)

Verkon ohjaustoimintaan kuuluu kaukokäyttöisten kytkinlaitteiden ohjaus valvomosta käsin tai maastossa manuaalisesti ohjattavien kytkinlaitteiden kytkentämuutosten johtaminen. Häiriötilanteiden hallintaan kuuluu vikojen tunnistaminen, paikantaminen sekä erottaminen terveestä verkosta. Ennen viankorjausta pyritään käyttämään varayhteyksiä vika-alueen rajaamiseksi mahdollisimman pieneksi. Häiriötilanteen aikainen asiakaspalvelu kuuluu myös käyttötoiminnan työnkuvaan. (Lakervi & Partanen 2008)

Sähköasemien ja keskijänniteverkon käyttötoiminnassa hyödynnetään laajasti automaatiotoimintoja, jotka mahdollistavat verkon tilan seurannan ja kauko-ohjaukset valvomosta käsin. Käyttötoiminnan kenttätoiminnot voidaan toteuttaa verkkoyhtiön omin resurssein tai hankkia ostopalveluna. Verkon ja resurssien sijainnin laajuus aiheuttaa omat haasteensa toiminnalle. Pienjänniteverkossa on huomattavasti vähemmän automaatiota, mutta tilanne on muuttumassa AMR-tekniikan (Automatic meter reading) lisääntymisen vuoksi. (Lakervi & Partanen 2008) Kehittyvän AMR-tekniikan voidaan odottaa mahdollistavan tulevaisuudessa myös tuotannon sekä kuormien ohjaukseen liittyvät toiminnot.

Käyttötoiminnan tukena tarvitaan monenlaisia tietoteknisiä apuvälineitä, joista käytetään yhteistä termiä sähköjakeluautomaatio. Sähköjakeluautomaatio voidaan jakaa kokonaisuuksiin, joita ovat yhtiö-, valvomo-, sähköasema-, verkosto ja asiakasautomaatio. Kuvaan 3 on esitetty käyttötoiminnan sähköjakeluautomaation eri tasot. Termi RTU (remote terminal unit) tarkoittaa tiedonsiirtoyksikköä, jolla verkostoautomaation osat on liitetty verkkoyhtiön tiedonsiirtojärjestelmiin. Yhtiötason automaatioon kuuluvat verkkoyhtiön tietojärjestelmien tiedot sekä sovellukset. Valvomoautomaatio koostuu käytönvalvonta- ja käytöntukijärjestelmistä, joiden toimintaa on tarkasteltu luvussa 3. Sähköasema-automaatio sisältää suojareleistyksen toiminnan, virta- ja jännitemittauksen, jännitteen säädöt sekä kytkinlaitteiden ohjauksen. Verkostoautomaatio sisältää kaukokäyttöisten erotinasemien ohjauksen, verkossa olevat virta- ja jännitemittaukset, sekä vianilmaisimien tiedonsiirron. Asiakasautomaatio sisältää toimintoja kuormitusten sekä tariffien ohjaukseen ja energiatietojen luentaan. (Lakervi & Partanen 2008) Asiakasautomaatio on Eleniassa kytketty tietoliikenneyhteyksien kautta käytöntukijärjestelmään sekä asiakas-tietojärjestelmään. Kuvaan 3 on lisäksi lisätty muuntamoautomaation taso, joka voi tarkoittaa esimerkiksi muuntamoille sijoitettavia mittauksia tai vianpaikannusta.



Kuva 3. Sähkönjakelun automaation eri tasot. (Lakervi & Partanen 2008) Kuvaan on lisätty sinisellä värillä muuntamoautomaation taso sekä keskijännitejohtolähdölle sijoitettu verkkokatkaisija.

Eleniassa käytössä olevassa käytönvalvontajärjestelmää ei tällä hetkellä hyödynnetä AMR-mittareilta saatavien mittaustietojen tai hälytysten käsittelyyn. AMR-mittareiden hälytykset sekä kyselyt on yhdistetty käytöntukijärjestelmään ja mittaustiedot asiakastietojärjestelmään. Verkkotietojärjestelmän ja käytöntukijärjestelmän rinnalle on otettu käyttöön mobiiliverkkotietojärjestelmä, jossa voidaan käyttää joitain verkkotietojärjestelmän ja käytöntukijärjestelmän ominaisuuksia esimerkiksi maastossa töitä tekevän asentajan toimesta.

2.7 Verkossa suoritettavat työt

Jakeluverkossa suoritetaan rakennus- ja kunnossapitotöitä ja viankorjausta, joiden turvallisuuden ja toteutettavuuden arvioinnissa tulee ottaa huomioon verkkoon kytkeytyneet tuotantokohteet. Standardiin SFS 6002 kirjatun kansallisen lisävaatimuksen mukaisesti jokaista suurjännitteisessä sähkölaitteistossa suoritettavaa työtä varten on laadittava kirjallinen kytkentäsuunnitelma. Kytkeäsuunnitelmaa ei tarvita yksittäisen laitteen kytkeästä sekä häiriö- ja hätäkytkentää varten. (SFS 6002 2015) Etenkin mikrotuotantokohdeiden määrän voimakas kasvu vaatii lisähuomion keskittämistä turvallisuuden takaamiseksi. Keskeisessä roolissa tuotantokohteiden huomioimisessa on käytönvalvonta-

sekä käytöntukijärjestelmistä saatava tuotantokohteita koskeva dokumentaatio. Yksityiskohtaiset tuotantokohteisiin liittyvät tiedot tallennetaan verkkotietojärjestelmään.

Elenian verkossa suoritetaan vuositason noin viisituhatta kytkentäohjelmaa, joista noin kolmasosaan liittyy asiakaskeskeytys (Elenia 2019a). Elenian verkossa töitä tekevät kumppanit tekevät sähköverkon töistä kytkentäaloitteet käytöntukijärjestelmän kautta ja kytkentäohjelmat laaditaan kytkentäaloitteiden tietojen perusteella. Kytkentäsuunnittelun aikana huomioidaan työn asiakasvaikutukset, verkon kytkentätilanne sekä kytkinlaitteiden käytettävyyden kyseessä olevaan työhön liittyen. Keskeisenä kytkentäsuunnittelun osana on lisäksi turvallisuuskulmien huomioiminen.

Asiakashaitan minimoimiseksi kytkentäsuunnitelmat tehdään siten, että suunniteltuja keskeytyksiä pyritään välttämään tai niiden vaikutuksia pienentämään, mikäli mahdollista. Asiakashaittaa voidaan pienentää esimerkiksi hyvällä työhön liittyvällä valmistelulla ja suunnittelulla sekä sopivia jännitetyömenetelmiä käyttämällä. Myös varavoimakonetta voidaan käyttää asiakaskeskeytysten lyhentämiseen tai välttämiseen. Yksi tämän diplomityön aihevalintaan keskeisesti vaikuttaneista tekijöistä on juuri verkkoon kytkettyjen pien- ja mikrotuotantokohteiden verkkoon aiheuttamat ilmiöt suunniteltujen kytkentätöiden yhteydessä. Tällä hetkellä verkkoon liitetyn hajautetun pientuotannon määrä on niin pieni, ettei tuotantolaitteistojen vaikutusta varavoimakoneen toimintaan ja varavoimalla syötetyn muuntopiirin käyttäytymiseen ole tarvinnut erikseen arvioida (Kamppari 2019).

Viime vuosina voimakkaasti kasvaneen jakeluverkkoon liitettyjen hajautettujen mikro- ja pientuotantokohteiden määrän on Elenian käytönsuunnittelussa havaittu aiheuttavan lisätyötä kytkentäsuunnitelmille lisättävien turvallisuustoimenpiteiden määrän kasvaessa ja töihin liittyvien kytkentäajojen monimutkaistuesssa. (Kamppari 2019) Tuotantokohteita käsitellään kytkentäsuunnittelun näkökulmasta luvussa 2.7 esitellyn Elenian sisäisen tuotantokohteiden huomioimiseen liittyvän ohjeistuksen mukaisesti, mikä vaikuttaa usein kytkentäaikoihin ja joissain tapauksissa myös keskeytyksestä aiheutuvan haitan suuruuteen. Tuotantokohteiden määrän lisääntyminen on aiheuttanut tarpeen tarkastella tuotantokohteiden vaikutusta käyttötoimintaan. Tässä työssä tarkastelu on suunnattu koskemaan verkossa suoritettavia suunniteltuja töitä.

2.7.1 Jännitteettömät työt jakeluverkossa

Jakeluverkossa suoritettavaan työhön liittyy usein asiakaskeskeytys, jonka vaikutusalue pyritään kytkentämuutoksia tekemällä, esimerkiksi rengasyhteyksiä hyödyntäen rajaamaan mahdollisimman pieneksi. Monissa tilanteissa verkossa tehtävän työn suorittaminen keskeytyksettömillä työmenetelmillä ei kuitenkaan ole mahdollista esimerkiksi verkon komponenttien rakenteesta, topologiasta tai suoritettavan työn laadusta johtuen mahdollista. (Kamppari 2019)

Sähkötyöturvallisuutta koskevan standardin SFS 6002 mukaan jännitteettömänä suoritettavien töiden edellytyksenä on luotettavasti jännitteettömäksi erotettu työalue. Standardissa on eritelty viisi turvallisuussääntöä, joiden mukaan jännitteetön työskentelyalue muodostetaan:

1. täydellinen erottaminen
2. jännitteen kytkemisen estäminen
3. laitteiston jännitteettömyyden toteaminen
4. työmaadoittaminen
5. suojaus lähellä olevilta jännitteisiltä osilta. (SFS 6002 2015)

Keskeytysalue tulee erottaa täydellisesti ja kaikinapaisesti kaikista syöttösuunnista. Erotukseen voidaan käyttää näkyvää ilmaväliä, jonka luomiseen soveltuvia laitteita ovat erotimet, erotuskytkimet, sulakkeiden poisto, jännitetyökatkopaikat, erottamiseen soveltuvat katkaisijat ja vikavirtasuojat. (SFS 6002 2015)

Erottamisen jälkeen tulee jännitteen kytkeminen manuaalisesti tai kauko-ohjatusti estää lukituksin. Erotuskohtaan on asennettava sopiva uudelleenkytkennän kieltävä kilpi. Työalueen erottamisen jälkeen on todettava kaikkien vaiheiden jännitteettömyys jännitteenkoestimella tai luotettavalla jännitteenilmaisinjärjestelmällä. Jännitteettömäksi todettu alue tulee työmaadoittaa ja oikosulkea kaikista syöttösuunnista työkohteeseen nähden. Lisäksi tulee huomioida mahdollisten työkohteen läheisyydessä olevien jännitteisten osien suojaaminen kosketukselta. (SFS 6002 2015)

Vaarallisen takasyötön mahdollistavat kohteet, kuten työkohteen takatietä käyvät tuotantolaitokset ja varavoimakohde tulee huomioida mahdollisten syöttösuuntien tapaan kytkentäsuunnitelmaa laadittaessa. (SFS 6002 2015) Myös Energiateollisuuden verkostosuosituksessa mikrotuotannon liittämisestä sähkönjakeluverkkoon erikseen tarkennetaan, että tuotantokohteiden erotuslaitteiden tulee standardin SFS 6002 todetun mukaisesti perustua näkyvään ilmaväliin tai luotettavaan mekaaniseen asennonosoitukseen. Jakeluverkon haltijalla täytyy lisäksi standardin SFS 6000 mukaisesti olla rajoittamaton pääsy erotuslaitteelle tai kaukokytkentämahdollisuus. (Energiateollisuus 2016b)

2.7.2 Jännitetyöt jakeluverkossa

Suunniteltuihin jakeluverkon töihin liittyvä asiakashaitta pyritään minimoimaan, joten on edullista suosia työmenetelmiä, joihin ei liity asiakkaiden kokemaa keskeytystä. Jännitetyöt tai muut keskeytyksettömät työmenetelmät parantavat sähkönjakelun laatutasoa. Asiakaskeskeytysten välttäminen mahdollistaa lisäksi varsinaisten asennustöiden suorittamisen ilman suunnitellun keskeytysajan aiheuttamia aikatauluvaatimuksia. Verkossa suoritettavat työt voivat tilanteesta riippuen olla yhdistelmiä jännitteellisistä töistä ja edellisessä luvussa 2.7.1 kuvatuista asiakaskeskeytyksellisistä töistä.

Standardin SFS 6002 mukaan jännitetyöllä tarkoitetaan sähkölaitteistoon kohdistuvaa työtä, jonka yhteydessä ollaan kosketuksissa tai ulotutaan jännitetyöalueelle työvälinein tai ruumiinosin. Jännitetyön yhteydessä muutetaan tarvittaessa jännitetyölähtöä suojaavien releiden suojausasetteluita automaattisten jälleenkytkentöjen sekä mahdollisten automaattisten varasyöttöjen estämiseksi. Näin saadaan ennaltaehkäistyä haitalliset kytkentäilyjännitteet. (SFS 6002 2015) Jännitetöitä suunniteltaessa tulee huomioida myöhemmin luvussa 2.7.4 kuvattavien menettelytapojen mukaisesti tuotantokohteiden siirtäminen pois jännitetyöalueelta mahdollisuuksien mukaan tai tarvittaessa erottaminen verkosta. Laadittavalle kytkentäsuunnitelmalle merkitään käyttökeskusta varten tieto jännitetyöalueen ulkopuolelle siirrettävästä tai työn ajaksi alas ajettavasta tuotantokohteesta.

Standardit eivät suoraan ota kantaa jännitetyöalueella sijaitsevien tuotantokohteiden vaatimiin toimenpiteisiin. Standardissa SFS 6002 määritellään kuitenkin, että sähkölaitteiston käyttöä valvovan henkilön on saatettava ja pidettävä verkko työtä varten määritellyssä tilassa. (SFS 6002 2015) Tässä yhteydessä jännitetyöalueelle kytkettyä tuotantolaitteistoa voidaan pitää takasyötön mahdollistavana laitteistona, joka ei ole käyttöä valvovan henkilön valvonnassa ja hallittavissa mahdollisen työvirheen tai muun kytkentäsuunnitelmasta poikkeavan tilanteen johdosta.

2.7.3 Sähkö- ja sähkötyöturvallisuus

Hajautetuilla pien- ja mikrotuotantokohteilla on merkittävä vaikutus sähkö- ja sähkötyöturvallisuuteen jakeluverkossa. Tuotantokohteiden määrän lisääntyminen on aiheuttanut tarpeen kehittää tuotantokohteisiin liittyviä käytäntöjä sähkönjakeluverkossa tehtävien töiden osalta sekä tarkastella niihin liittyvä erityispiirteitä. Eleniällä käytössä olevia käytäntöjä on karkealla tasolla esitelty luvussa 2.7.4.

Sähköturvallisuuslain (1135/2016) tarkoituksena on tämän diplomityön aiheen mukaisesti rajattuna sähköverkkoyhtiön käyttötoiminnan tapauksessa varmistaa sähkölaitteiston käyttötyön sekä sähkötyön pitäminen turvallisena. Sähkötyöksi katsotaan sähkölaitteen tai -laitteiston asennus-, korjaus- ja huoltotyöt. (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016)

2.7.4 Tuotannon huomioimen käyttötoiminnassa, nykytilanne

Eleniassa on käytössä yhtiön sisäinen ohjeistus, joka määrittelee eri suuruisten tuotantokohteiden vaatimat toimenpiteet erityyppisten verkossa tehtävien töiden osalta. Ohjeistus on laadittu kokemusten ja vakiintuneiden käytäntöjen pohjalta. Mikro- ja pientuotantolaitteistojen lukumäärän kasvaminen jakeluverkossa on kuitenkin aiheuttanut tarpeen tarkastella tarkemmin tuotantokohteiden verkkoon aiheuttamia ilmiöitä.

Pienjänniteverkossa suoritettavien keskeytyksellisten töiden osalta verkkoyhtiön tiedossa olevat tuotantokohteet on nykyisen ohjeistuksen mukaan erotettava aina työkohteesta ja

tuotantokohteiden suunta on päätyömaadoitettava. Verkkotietojärjestelmään dokumentoituja, suunniteltujen töiden yhteydessä käytettäviä tai esimerkiksi kumppanin tai asiakkaan kontaktoinnin yhteydessä tietoon tulevia varavoimakoneita käsitellään edellä esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Yli 10 kVA tuotantokohteiden osalta nykyinen ohjeistus vaatii tuotannon alasajon ja tuotantolaitteistojen erottamisen verkosta mahdollisimman läheltä käyttöpaikkaa. Suunnitelluilla keskeytyksillä alle 10 kVA tuotantokohteita ei ole pidetty tarpeellisena ajaa alas ennen keskeytyksen aloittamista ja ne voidaan erottaa työkohteesta esimerkiksi muuntajaerotinta tai pienjännitekeskuksen pääkytkintä käyttäen. (Elenia 2019a)

Mikäli töitä tehdään keskijänniteverkon puolella, on tällä hetkellä riittävänä toimenpiteenä pidetty alle 10 kVA tuotantokohteiden erottamista siten, ettei takasyötön vaaraa työkohteena olevaan keskijänniteverkkoon ole. Saarekesyöttöjen kannalta olisi tärkeää kyetä määrittelemään muuntopiirin muille käyttöpaikoille vaurioita aiheuttavan mikro-tuotantolaitteiston nimellisteho tilanteessa, jossa tuotantolaitteisto ei kytkeydy vaatimusten mukaisesti irti verkosta jännitteen tai taajuuden poiketessa standardien mukaisesta jakelujännitteestä. (Elenia 2019a)

Jännitetöiden tapauksessa nimellisteholtaan yli 10 kVA tuotantokohteet on nykyisen ohjeistuksen mukaan erotettava verkosta niiden alasajon jälkeen tai siirrettävä toiselle keskijännitelähdölle. Jännitetöiden osalta alle 10 kVA tuotantokohteita ei tähän asti ole Eleniassa pidetty riskinä sähkötyöturvallisuuden kannalta, koska työkohteena olevaa erottamatonta ja maadoittamatonta keskijänniteverkon osaa on joka tapauksessa käsiteltävä jännitteisen osan tavoin. Alle 10 kVA tuotantokohteiden lukumäärällä ei nykyisen ohjeistuksen mukaan ole merkitystä jännitetyön toteutuksen edellytyksiä tarkasteltaessa. (Elenia 2019a)

2.7.5 Tuotantoasiakkaiden kontaktointi suunniteltuihin töihin liittyen

Verkkopalveluehtojen (VPE2019) mukaisesti verkonhaltija voi tarvittaessa keskeyttää asiakkaan verkkopalvelun tilapäisesti tai asettaa tuotantolaitteistolle esimerkiksi huolto- tai kunnossapitotöihin perustuvia rajoituksia. Keskeytyksen kesto ei saa olla tarpeettoman pitkä ja keskeytyksen valmistelussa sekä suunnittelussa tulee pyrkiä minimoimaan asiakkaan keskeytyksen vuoksi kokema haitta. Verkkoyhtiön tulee tiedottaa asiakasta suunnitellusta jakelukeskeytyksestä etukäteen riittävällä tavalla. (Energiateollisuus 2019c)

Tuotantoasiakkaat saavat kytkentäsuunnittelun yhteydessä postitse tai sähköisiä viestintäkanavia käyttäen lähetetyn keskeytysilmoituksen, mikäli käyttöpaikalle aiheutuu suunnitellusta työstä sähkönjakelun keskeytys. Mikäli tuotantolaitteisto on tarpeen ajaa alas ja erottaa luotettavasti jännitetyön ajaksi siten, ettei asiakkaan kulutuspaikalle aiheudu sähkönjakelun keskeytystä, ei asiakas saa tästä järjestelmän automaattisesti muodostamaa

keskeytysilmoitusta. Edellä kuvatussa tilanteessa asiakkaan kontaktointi on suoritettava kytkentäsuunnittelijan toimesta. (Elenia 2019a)

Elenian sisäisen tuotantokohteiden huomioimista käsittelevän ohjeistuksen mukaisesti nimellistehoaltaan alle 10 kVA tuotantokohteille aiheutuvia keskeytyksiä ei tarvitse erikseen sopia asiakkaan kanssa. Keskeytyksellisissä töissä kyseiseen teholuokkaan kuuluvat tuotantokohteen voidaan erottaa keskeytysalueelta ilman erillistä alasajoa tuotantokohteen nähden Elenian verkon kytkinlaitteilla. Mikäli tuotantokohde on sijoittunut esimerkiksi pienjänniteverkon lähdölle siten, ettei se ole erotettavissa Elenian kytkinlaitteita käyttäen, voidaan erotukseen käyttää asiakkaan laitteistoon asennettavaksi vaadittua tuotannon erotuskytkintä. Asiakkaan erotuskytkintä tai muuta tuotantolaitteiston erottamiseen käytettävää luotettavaa avausväliä käytettäessä tulee asiakas kontaktoida etukäteen kytkentäsuunnittelun yhteydessä toimenpiteen onnistumisen varmistamiseksi. (Elenia 2019a)

Mikäli verkkoon liitetyn tuotantokohteen nimellisteho on yli 10 kVA, tulee asiakas kontaktoida Elenian sisäisen tuotanto-ohjeistuksen mukaisesti etukäteen kytkentäsuunnittelun yhteydessä. Samalla sovitaan erotukseen liittyvistä toimenpiteistä sekä yhteydenpidosta kytkentöjen aikana. Asiakkaalle tulee lähettää kirjallinen ilmoitus keskeytyksestä ja siihen liittyvistä sovituista toimenpiteistä. (Elenia 2019a) Näin asiakkaalle jää selkeä käsitys Elenian menettelytapojen mukaisesta tuotantolaitteiston alas ajamisesta ennen verkossa suoritettavia suunniteltuja töitä. Tuotantolaitteiston alasajon jälkeinen erotus aiheuttaa asiakkaalle joissain tapauksissa myös sähkönjakelun keskeytyksen samalle samaan liittymään kuuluvalla kulutuskäyttöpaikalle tai esimerkiksi tuotannon omakäytösähköön.

3. HAJAUTETUN TUOTANNON AIHEUTTAMAT VAATIMUKSET

Tässä luvussa käsitellään sähköjakeluverkkoon liitettyä hajautettuja tuotantolaitoksia koskevia vaatimuksia verkkoon liittämisen, dokumentaation, teknisten ominaisuuksien sekä suojausvaatimusten osalta. Käyttötoiminta aiheuttaa lisäksi jotain vaatimuksia tuotantolaitteistojen huomioimiselle verkossa suoritettavien töiden aikana.

Hajautetun tuotannon lisääminen verkkoon muuttaa keski- ja pienjänniteverkkojen topologiaa sekä asettaa uusia vaatimuksia tehon mahdollisten syöttösuuntien lisääntymisen myötä. Perinteiset jakeluverkon suojaukset on normaalisti suunniteltu siten, että vikapaikan vikavirtaa syöttää vain yksi piste esimerkiksi sähköasemalla. Hajautettu tuotanto saattaa aiheuttaa lisävaatimuksia suojausasetteluille. Myös sähkövarastojen voidaan todeta olevan rinnastettavissa hajautettuun tuotantoon vikatilanteissa. (Kauhaniemi & Voima 2012)

3.1 Tuotantolaitoksen liittäminen verkkoon

Tuotantolaitokset voivat syöttää tehoa verkkoon karkeasti jaoteltuna kolmella eri tavalla, joita ovat epätahtigeneraattorit, tahtigeneraattorit sekä inverttereihin perustuvat ratkaisut. Mikrotoisantokohteet liittyvät verkkoon lähes poikkeuksetta invertterikäyttöjen kautta. Pientuotantokohteet voivat käytännössä kuulua kaikkiin edellä lueteltuihin ryhmiin.

Energiateollisuus on julkaissut päivitetyt verkkopalveluehdot (VPE2019) huhtikuussa 2019. Verkkopalveluehtoihin on aiemmista versioista poiketen lisätty erikseen viides luku, joka käsittelee verkkoon liitettävää sähköntuotantolaitteistoa koskevia erityisvaatimuksia. (Energiateollisuus 2019c) Uuden luvun lisääminen verkkopalveluehtoihin on perusteltua asiakkaiden tiedonsaannin helpottamiseksi, koska jakeluverkkoon liitettyjen tuotantolaitteistojen määrät ovat kasvaneet huomattavasti edellisten vuosien aikana tuotantolaitteistoihin liittyvien investointikustannusten pienentyttyä. Tuotantoasiakkaita aiemmin koskeneet tuotannon verkkopalveluehdot (TVPE11) on jätetty julkaisematta erillisenä dokumenttina ja yhdistetty uusiin verkkopalveluehtoihin. (Minkkinen 2019)

Verkkopalveluehdoissa painotetaan tuotantolaitteiston omistajan vastuuta liittyen laitteiston määräystenmukaisuuteen niin fyysisen laitteiston kuin sen suojausasetteluiden osalta, ajantasaiseen dokumentaatioon sekä ennen laitteiston käyttöönottoa vaadittavaan verkkoyhtiölle tehtävään ilmoitukseen liittyen uuden tuotantolaitteiston verkkoon liittämiseen. Uuden tuotantolaitteiston saa kytkeä syöttämään verkkoon ainoastaan verkkoyhtiön antaman luvan perusteella, jotta verkon ominaisuudet liittymispisteessä voidaan huomioida

esimerkiksi asiakkaan sekä verkkoyhtiön suojauksia määriteltäessä. Lisäksi samalla voidaan arvioida jakeluverkkoon tai asiakkaan liittymään kohdistettavien muutosten tarve. (Energiateollisuus 2019c)

Mikäli tuotantolaitteiston käyttöönotto tai laitteistoon tehtävä muutos edellyttää muutoksia jakeluverkkoon tai liittymän kokoon, vastaa sähköntuottaja verkkoyhtiölle aiheutuneista kustannuksista liittymismaksuperiaatteiden mukaisesti. Verkkoyhtiöllä on mahdollisuus määrätä rajoituksia sähköntuotantolaitteiston käyttöön, mikäli jakeluverkon ominaisuudet, käyttö- tai huoltotilanteet näin vaativat. Jakeluverkkoon syötettävän sähkö tulee täyttää sähkön laatua koskevien standardien vaatimukset. (Energiateollisuus 2019c)

3.2 Tuotantokohteiden dokumentaatio

Verkkopalveluehtojen (VPE 2019) sekä standardin SFS 6002 (SFS 6002 2015) mukaisesti jakeluverkon haltija kerää riittävän dokumentaation verkkoon liitetyistä tuotantokohteista, jotta tuotantokohteet voidaan huomioida verkkoon kohdistuvia toimenpiteitä suunniteltaessa sekä käyttötoiminnan yhteydessä esimerkiksi suunniteltuihin kytkentätöihin sekä viankorjaukseen liittyen. Energiateollisuus on ohjeistuksessaan määritellyt, että tuotantolaitteistosta tulee toimittaa ennen liittämistä verkkoon seuraavat keskeiset dokumentit ja tiedot:

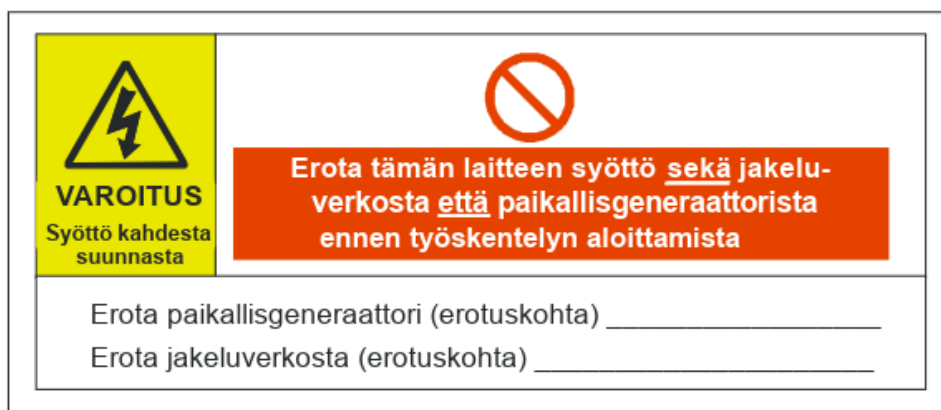
1. laitoksen tyyppi, nimellisteho, nimellisvirta sekä oikosulkuvirta
2. liitäntälaitteen (vaihtosuuntaajan tyyppitiedot)
3. suojauksen asetteluarvot ja toiminta-ajat
4. tiedot saarekekäytön estosuojauksen toteutuksesta (menetelmä ja toiminta-aika. (Energiateollisuus 2016c)

Standardin SFS-EN 50438 mukaisesti mikrogeneraattoriin on kiinnitettävä varoitusmerkintä sellaiseen kohtaan, että henkilö, joka aikoo päästä käsiksi jännitteisiin osiin, huomaa ennakkoon varoituksen useista jännitteen syöttösuunnista. Erityistä huomiota tulee kiinnittää siihen, ettei jännite välttämättä katkea laitteen verkko-osasta, mittausjohtimista tai muista vastaavista osista liitäntälaitteen suojakytkimen avauksen jälkeen. (SFS-EN 50438 2015)

Varoituskilvet tulee kiinnittää vähintään seuraaviin kohtiin:

- 1) jakeluverkkoyhtiön ja kuluttajan sähkökeskukseen ilmoittaen, että keskukseen on liitetty mikrogeneraattori
- 2) kaikkiin sähkökeskuksiin, jotka ovat kuluttajan sähkökeskuksen ja mikrogeneraattorin välillä
- 3) mikrogeneraattorin ulkovaippaan tai itse mikrogeneraattoriin
- 4) kaikkiin kohteisiin, joista mikrogeneraattori voidaan erottaa jakeluverkosta. (SFS-EN 50438 2015)

Varoituskilven tiedot on merkittävä asennusmaan mukaisella kielellä ja alueellisia käytäntöjä noudattaen. Kuvassa 4 on esitetty standardin SFS-EN 50438 sisältämä esimerkki mikrogeneraattorin varoituskilvestä. (SFS-EN 50438 2015)

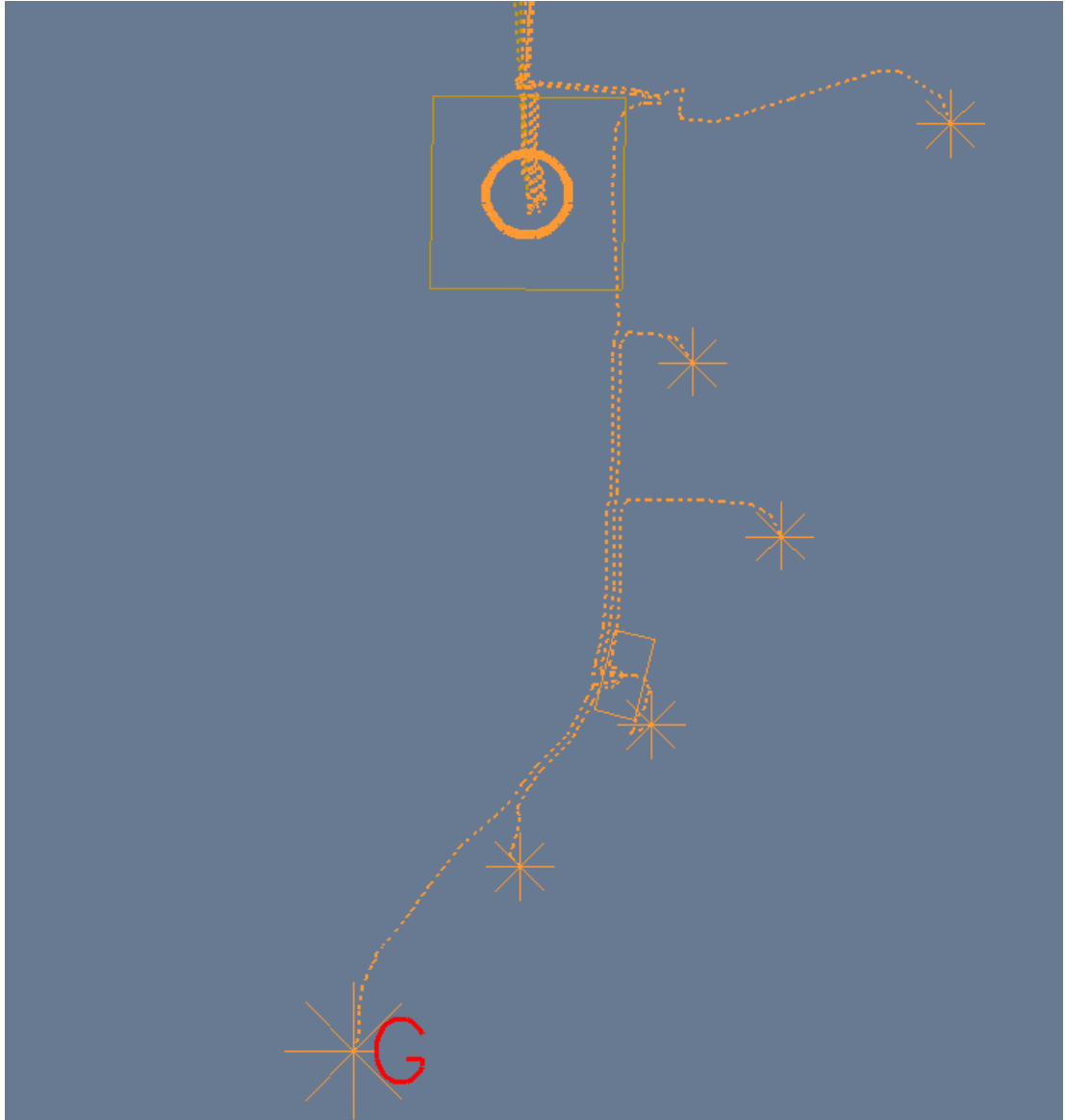


Kuva 4. Standardin SFS-EN 50383 esimerkki mikrogeneraattorin varoituskilvestä. (SFS-EN 50438 2015)

Energiateollisuuden verkkosivuilta on saatavissa pientuotannon yleistietolomake (Liite A), johon täytetään verkkoyhtiön kannalta tarvittavat, keskeiset tiedot alle 100 kVA pientuotantolaitteiston tai mahdollisen sähkövaraston liittämiseksi sähköverkkoon. Eleniassa lomakkeet tallennetaan automaattisesti ja lähes reaaliaikaisesti asiakastietojärjestelmän kautta saatavaksi myös verkkotietojärjestelmän sekä käytöntukijärjestelmän kautta asiakkaan liittymätietojen kautta. Tämä mahdollistaa tuotantokohteiden ominaisuuksien tarkastelun esimerkiksi kytkentäsuunnittelua tai käytönvalvontaa suorittavan henkilön toimesta.

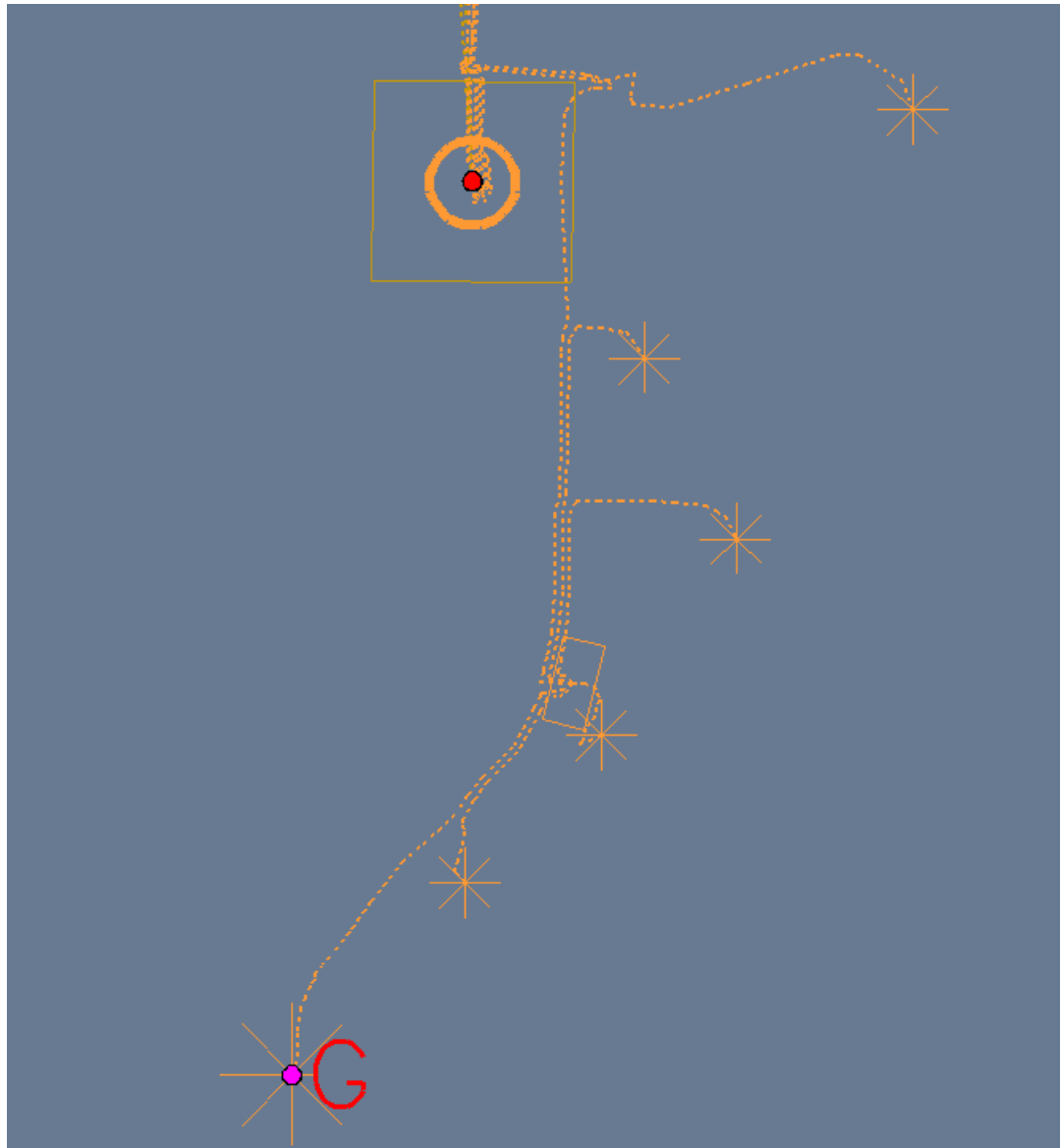
Verkkotietojärjestelmän kenttiin tallennetaan lisäksi tiedot tuotantolaitteiston teholuokasta, nimellistehosta, erotuskytkimen sijainnista sekä liittämisaikakohdasta. Tiedot ovat näin verkkotietojärjestelmän tai käytöntukijärjestelmän käyttäjän luettavissa ilman yleistietolomakkeen avaamista erikseen. Tuotantokohteet on luokiteltu Eleniassa verkkotietojärjestelmään teholuokkiin, joita ovat alle 10 kVA, 10...100 kVA sekä yli 100 kVA. Teholuokkia voidaan hyödyntää haettaessa erityisellä valittuun verkkoon perustuvalla hakutoiminnolla tietoja esimerkiksi tietyn muuntopiirin, keskeytysalueen tai jännitetyölähdön asiakkaista. Nykytilanteessa teholuokitus alle ”10 kVA” on käyttökelpoinen, koska kyseiseen luokkaan kuuluvia tuotantokohteita ei tarvitse luvussa 2.7 esitetyn Elenian sisäisen ohjeistuksen mukaisesti erottaa verkosta jännitetöiden ajaksi.

Eleniassa käytössä olevassa käytöntukijärjestelmässä on erikseen generaattorisymbolilla visualisoitu liittymät, joille on liitetty tuotantoa. Tämän visualisoinnin näkyminen edellyttää, että pienjänniteverkko on ladattu näkyviin tarkasteltavalta verkon osalta. Kuvassa 5 on esitetty edellä kuvattu näkymä. Järjestelmään oletuksena visualisoidut tuotantokohteet helpottavat standardia SFS 6002 noudattelevaa käytönvalvontaa sekä esimerkiksi vianhoitoa, koska tuotantokohteita ei tarvitse erikseen hakea järjestelmästä.



Kuva 5. Tuotantokäyttöpaikan sisältävä liittymä visualisoituna generaattorisymbolilla käytöntukijärjestelmän verkkotopologiaan.

Lisäksi erillistä hakutoimintoa käyttäen on mahdollista visualisoida kartalle korostuspistein muuntopiirit sekä liittymät, joihin on liittyneenä tuotantoa. Toiminto on varsin hyödyllinen käyttötoiminnan näkökulmasta ja sen mukainen näkymä on esitetty kuvassa 6. Edellisessä kuvassa 5 esiintyvä liittymään yhdistetty generaattorisymboli säilyy näkyvässä uusien visualisointien lisäksi. Tuotantokäyttöpaikan sisältävää muuntopiiriä kuvaa punainen korostuspiste ja tuotantokäyttöpaikan sisältävää liittymää lila piste.



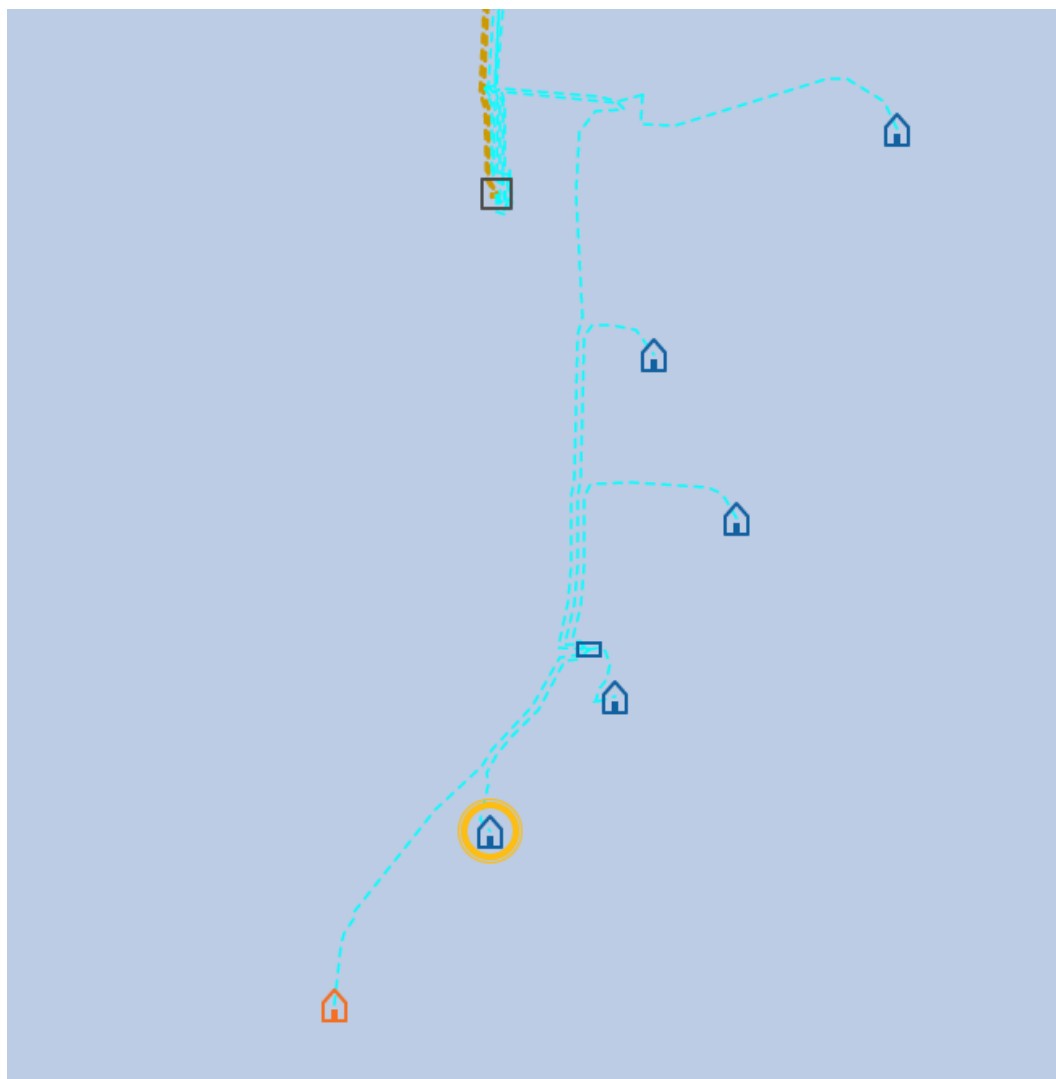
Kuva 6. Korostuspisteillä visualisoitu muuntamo, jonka syöttämään pienjänniteverkkoon on kytkettyä tuotantoliittymä.

Käyttäjä voi itse määrittää kuvassa 6 esitetty muuntopiiri- ja liittymäkohtaiseen tuotantohakuun liittyvien korostuspisteiden värin sekä koon. Muuntopiirikohtaisen tuotantohaun käyttäminen parantaa käytöntukijärjestelmän käyttäjäkokemusta, koska muuntopiireihin kytkeytyvät tuotantokohteet näkyvät verkkotopologiassa riippumatta siitä, onko pienjänniteverkko ladattuna. Korostuspisteet skaalautuvat lisäksi karttapohjanäkymän koosta riippumatta siten, että pisteen koko pysyy käyttäjän määrittämän arvon mukaisesti vakiona.

Eleniassa käytössä oleva mobiiliverkkotietojärjestelmä mahdollistaa nopeat hakutoiminnot osoitteiden sekä verkko- ja asiakastietojen perusteella. Eri käyttäjäryhmille voidaan tarjota myös käytöntukijärjestelmän kautta luettavissa olevia tietotasoja tarkasteltavasta verkosta. Järjestelmän kautta onnistuu reaaliaikaisen tilannekuvan seuranta topologian sekä kytkinlaitteiden tilatietojen avulla. Lisäksi järjestelmä mahdollistaa vianhoidossa

hyödynnettävien toimintojen, kuten vikailmoitusten tietojen sekä pienjänniteverkon tilatietojen muuttamisen ja sovelluksen käyttäjän sijaintitiedon jakamisen käytöntukijärjestelmään.

Käytöntukijärjestelmän tapaan tuotantokäyttöpaikan sisältävät liittymät on visualisoitu oletuksena mobiiliverkkotietojärjestelmässä. Kuvassa 7 on esitetty kuvaa 5 vastaava mobiiliverkkotietojärjestelmän näkymä.



Kuva 7. Tuotantokäyttöpaikan sisältävä liittymä visualisoituna punaisella korostusvärillä mobiiliverkkotietojärjestelmän topologiaan.

Käyttötoiminnan kannalta on tärkeää, että pientuotantoa sisältävät tuotantokäyttöpaikat on dokumentoitu yhtenevän käytännön mukaisesti käytöntukijärjestelmään. Ajantasainen dokumentaatio mahdollistaa kytkentäsuunnittelun sekä käytönvalvonnan ja vianhoidon turvallisen toteuttamisen kaikilta edellä mainittuihin toimintoihin osallistuvilta osapuolilta.

3.3 Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset

Kantaverkkoyhtiö Fingrid on julkaissut vuonna 2018 uudet voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV2018), joissa määritellään sähkövoimajärjestelmään tai asiakkaan verkkoon kytkettäviä nimellistehoita yli 0,8 kVA voimalaitoksia sekä sähkölaitteistoja koskevat ehdot ja vaatimukset. Voimalaitosten järjestelmäteknisiä vaatimuksia noudattamalla varmistetaan, että voimalaitokset kestävät voimajärjestelmän aiheuttamat jännite- ja taajuusvaihtelut, eivät aiheuta järjestelmään häiriöitä ja toimivat kaikissa käyttötilanteissa luotettavasti. Vaatimusten yhtenä tarkoituksena on auttaa Fingridiä sekä verkkoyhtiöitä saamaan tarvittavat voimalaitoksia koskevat tiedot käyttöönsä. (Fingrid Oyj 2018) Tässä luvussa on käyty läpi voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset hajautetun pientuotannon näkökulmasta keskeisiltä osin.

Dokumentissa määritellään erikseen suuntaajakytketty voimalaitos, joka on sähköä tuottava yksikkö tai yksiköiden muodostama kaupallinen kokonaisuus, joka on liitetty sähköverkkoon joko synkronoimattomasti tai tehoelektroniikan kautta ja jolla on myös yksi liittymispiste sähköverkkoon, jakeluverkkoon, mukaan lukien suljettu jakeluverkko, tai suurjännitteiseen tasasähköjärjestelmään. Voimalaitokset on jaoteltu neljään eri tyyppiin, jotka on esitetty taulukossa 3. Vaatimusten ulkopuolelle on rajattu erilliskäytössä olevat, kuukaudessa alle 5 minuuttia sähköjärjestelmään kytkettynä varavoimalaitokset sekä esimerkiksi akkuteknologiaan perustuvat energiavarastot, pois lukien pumppuvoimalaitokset. (Fingrid Oyj 2018)

Taulukko 3. Voimalaitosten tyyppiluokittelu mitoitusstehon ja liittymispisteen jännitetason perusteella. (Fingrid Oyj 2018)

Tyyppiluokka	Liittymispisteen jännitetaso	Ehto	Voimalaitoksen mitoitussteho P_{max}
Tyyppi A	Alle 110 kV	ja (*)	$0,8 \text{ kW} \leq P_{max} < 1 \text{ MW}$
Tyyppi B	Alle 110 kV	ja (*)	$1 \text{ MW} \leq P_{max} < 10 \text{ MW}$
Tyyppi C	Alle 110 kV	ja (*)	$10 \text{ MW} \leq P_{max} < 30 \text{ MW}$
Tyyppi D	Vähintään 110 kV	tai (+)	$P_{max} \geq 30 \text{ MW}$

Taulukosta 3 voidaan lukea, että Tyypin A voimalaitosten mitoitussteho P_{max} on vähintään 0,8 kW, mutta alle 1 MW. Suuntaajakytketyn voimalaitoksen mitoitussteho on luokiteltava laitteiston kokonaiskapasiteetin perusteella. (Fingrid Oyj 2018) Energiatieteellisuuden pientuotantokohteille asettamasta rajauksesta poiketen tässä työssä suoritettava tuotantokohteiden tarkastelu rajataan koskemaan tyypin A tuotantokohteita. Nimellistehoita tasemmalleen 1 MW:n voimalaitosten voidaan olettaa käyttäytyvän jakeluverkkoon liitettyinä tyypin A voimalaitosten tavoin, eikä tarkastelun laajentaminen tyypin B voimalaitoksiin ole tarpeen.

Tyypin A voimalaitoksen verkkoon liittämisen yhteydessä liittyjän on käyttöönottoilmoitusmenettelyn mukaisesti toimitettava asennusdokumentti. Tähän asennusdokumenttiin merkitään vaaditut tiedot ja se toimitetaan liittymispisteen verkonhaltijalle. Liittymispisteen verkonhaltijan on varmistettava, että kolmannet osapuolet voivat toimittaa käyttöönoton yhteydessä vaaditut tiedot liittyjän puolesta. (Fingrid Oyj 2018) Esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmien verkkoon liittämisen yhteydessä asiakkaan sähköurakoitsija toimittaa usein mikrotuotantolaitteistoa koskevan yleistietolomakkeen verkkoyhtiölle.

Liittymispisteen verkonhaltija määrittelee sille toimitettavan asennusdokumentin sisällön ja dokumenttiin on sisällyttävä vähintään seuraavat tiedot:

1. paikka, jossa fyysinen liityntä tehdään,
2. liittymispäivämäärä,
3. laitteiston mitoitus-teho kilowatteina,
4. primäärienergianlähteen tyyppi,
5. voimalaitoksen luokittelu kehityksessä olevaksi teknologiaksi Energiaviraston antaman vahvistuksen mukaisesti,
6. laitospaikalla sijaitsevista laitteista käytetyn valtuutetun todentajan antamien laitetodistusten viitetiedot,
7. sellaisten laitteiden osalta, joista ei ole saatu laitetodistusta, liittymispisteen verkonhaltijan ohjeiden mukaiset tiedot,
8. liittyjän ja asentajan yhteystiedot ja näiden allekirjoitukset. (Fingrid Oyj 2018)

Liittyjän on varmistettava, että liittymispisteen verkonhaltijalle ja Energiavirastolle ilmoitetaan voimalaitoksen pysyvästä käytöstä poistamisesta. Tällaisen ilmoituksen voivat asennusdokumentin tapaan tehdä myös kolmannet osapuolet. (Fingrid Oyj 2018)

Tyypin A voimalaitoksilta ei vaadita reaaliaikaisia mittauksia tai tiedonvaihtoa. Liittymispisteen verkonhaltija määrittelee ilmoitusmenettelyn ennen voimalaitoksen kytke- mistä verkkoon. (Fingrid Oyj 2018)

Voimalaitoksen on kyettävä toimimaan jatkuvasti ja normaalisti liittymispisteen verkonhaltijan määrittelemällä jännitealueella. Normaalin käyttötilanteen mukaisen jännitteen vaihtelun alueen on oltava vähintään 0,90–1,05 pu normaalista käyttöjännitteestä. Voimalaitoksen on kyettävä toimimaan jatkuvasti ja normaalisti, kun sähköjärjestelmän taajuus on 49,0–51,0 Hz ja kyettävä toimimaan 30 minuutin ajan, kun sähköjärjestelmän taajuus on 51,0–51,5 Hz tai 49,0–47,5 Hz. (Fingrid Oyj 2018)

Voimalaitoksen tulee kyetä jatkamaan normaalia toimintaansa normaalisti taajuuden muutosnopeuden ollessa alle 2,0 Hz/s. Taajuuden muutosnopeuden mittausta ei saa reagoida sähkövoimajärjestelmässä tapahtuvien häiriöiden aiheuttamiin äkillisiin muutoksiin jännitteen käyrämuodossa. Taajuuden muutosnopeuden tunnistavaa suojalaitetta saa käyttää voimalaitoksen suojaukseen ainoastaan sen nimellistehon ollessa alle 50 kW.

Suojalaite saa irrottaa voimalaitoksen verkosta, mikäli taajuuden muutosnopeutta on mitattu vähintään 500 millisekunnin ajan. Fingridin mukaan taajuuden muutosnopeuteen perustuvien suojalaitteiden virhetoiminnan riski on suuri ja odottamaton irtikytketyminen voi tapahtua normaalilla jännite-taajuustoiminta-alueella. Säteittäisesti käytetyissä sähköverkoissa suositellaan käytettävän taajuuden ja jännitteen mittaukseen perustuvaa suojausta saarekekäytön estämiseksi. (Fingrid Oyj 2018) Verkonhaltija voi vaatia erillisen saarekekäytönestosuojauksen tai esimerkiksi tiedonvaihdon toteuttamista, vaikka Fingrid onkin rajoittanut taajuuden muutosnopeuden havaitsemiseen perustuvan suojauksen käyttöä.

Voimalaitoksen tulee kyetä taajuussäätö-ylitaajuustoimintatilan määrittelyn mukaisesti pienentämään pätötehon tuotantoaan lineaarisesti taajuuden funktiona taajuuden ylittäessä 50,5 Hz, mikäli primäärienergian saatavuus ei aseta rajoitteita. Taajuussäätö-ylitaajuustoimintatilan statiikan tulee olla aseteltavissa välillä 2–12 % ja suositeltu asetteluarvo on 4 %. Säädön tulee aktivoitua mahdollisimman lyhyellä viiveellä, mutta kuitenkin enintään kahden sekunnin kuluessa, kun sähköjärjestelmän taajuus ylittää arvon 50,5 Hz. Voimalaitoksen tulee kyetä jatkamaan toimintaansa pienimmällä mahdollisella säätötasolla ja taajuussäätö-ylitaajuustoimintatilan tulee olla aina päällä. (Fingrid Oyj 2018)

Voimalaitoksen tulee kyetä ylläpitämään tavoitearvon mukaista pätötehoa taajuuden muutoksista riippumatta, paitsi silloin kun jokin taajuussäädön toimintatila on aktiivinen. Mikäli primäärienergian tuotanto heikkenee nopeasti, ei pätötehoa tarvitse ylläpitää erillisellä energiavarastolla. Voimalaitos saa sallitusti alentaa pätötehontuotantoaan lineaarisesti 10 % jokaista 1 Hz:n taajuusmuutosta kohden, kun sähköjärjestelmän taajuus alittaa 49 Hz. Voimalaitokset tulee varustaa etäohjausvalmiutta varten logiikkaliitännöillä, jotta pätötehon tuotanto voidaan lopettaa viiden sekunnin kuluessa käskyn saapumisesta syöttöporttiin. (Fingrid Oyj 2018)

Voimalaitos saa kytkeytyä automaattisesti sähköjärjestelmään, kun seuraavat ehdot täyttyvät:

1. sähköjärjestelmän taajuus on 49,0–51,0 Hz,
2. liittymispisteen jännite on normaalilla vaihteluvälillä,
3. voimalaitoksen pätötehon suurin sallittu muutosnopeus on korkeintaan 100 % mitoitustehosta minuutissa,
4. liittymispisteen verkonhaltija sallii automaattisen jälleenkytkentäjärjestelmän asentamisen ja automaattisen kytkeytymisen 1–10 minuutin kuluttua häiriön jälkeen. (Fingrid Oyj 2018)

Liittyjän vastuulla on todentaa voimalaitoksen toiminta sille asetettujen vaatimusten mukaisesti. Vaatimukset tulee todentaa ensisijaisesti voimalaitoksen käyttöönoton yhteydessä suoritettavilla kokeilla, jotka tehdään voimalaitoksen tavanomaisen primääriener-

gianlähteen avulla. Liittymispisteen verkonhaltija sekä Fingrid voivat halutessaan osallistua vaatimustenmukaisuuden varmentamiseen liittyviin kokeisiin joko laitosalueella tai verkonhaltijan valvomosta käsin. Käyttöönottokokeista laaditaan käyttöönottoraportti, joka toimitetaan verkonhaltijalle. Käyttöönottokokeen sisältö eri vaiheineen on dokumentoitu tarkemmin VJV2018-dokumenttiin. (Fingrid Oyj 2018)

Liittyjä voi korvata käyttöönottokokeen käyttäen valtuutetun todentajan antamia vaatimustenmukaisuuden osoittavia laitetodistuksia, jotka toimitetaan verkonhaltijalle. Laitetodistukset eivät takaa voimalaitoskokonaisuuden ja kaikkien apulaitteiden yhteistoimintaa, minkä vuoksi niitä ei hyväksytä ensisijaisena todentamismenetelmänä. Mikäli käyttöönottokokeiden suorittaminen ei ole mahdollista liittymispisteen verkonhaltijan verkon tai sähköjärjestelmän käyttötilanteen takia, tulee liittyjän sopia erikseen Fingridin ja liittymispisteen verkonhaltijan kanssa käyttöönottokokeen korvaamisesta. Fingridin tapauskohtaisesti hyväksymiä käyttöönottokokeen korvaavia menetelmiä ovat:

1. valtuutetun todentajan myöntämät laitetodistukset, akkreditoitujen laboratoriorien sertifikaatit tai vastaavat yksityiskohtaiset turpiinigeneraattoreiden testausraportit,
2. jatkuva seuranta,
3. todennettuja laskentamalleja käyttäen suoritettut laskentatarkastelut. (Fingrid Oyj 2018)

Käytännössä Elenian verkkoon kytkettyjen hajautettujen pientuotantokohteiden osalta kyse on useimmiten suuntaajakytketyistä aurinkosähköjärjestelmistä, joiden mitoitusteho on kilowattiluokassa. Käyttöönoton yhteydessä Energiateollisuuden Pientuotannon yleis-tietolomakkeelle (Liite A) täytetään vaaditut tuotantolaitteistoa koskevat tiedot sekä tiedot laitteiston suojauksen vaatimuksenmukaisuuden täyttymisestä standardiin SFS-EN50438 tai Saksalaiseen vaatimusdokumenttiin VDE-AR-N 4105 2011-8 perustuen. Tyypillisesti A-luokan tuotantolaitteistoille ei siis tehdä käyttöönottokokeita, vaan niiden vaatimustenmukaisuus todennetaan laitteistovalmistajan toimittamien laitetodistusdokumenttien perusteella. Myöskään jatkuvalla seurannalla ei ole tarvetta.

3.4 Suojausvaatimukset

Verkkoon liitettyjä hajautetuksi tuotannoksi luokiteltavia voimalaitoksia koskevat suojausvaatimukset määritellään standardeissa ja ne noudattelevat luvussa 3.3 aiemmin esitettyjä voimalaitoksille asetettuja vaatimuksia.

Standardissa SFS-EN 50438 nostetaan esille mikrotuotantoyksiköihin kohdistuvat keskenään ristiriitaiset vaatimukset. Hajautetuksi tuotannoksi luettujen generaattoreiden ja mikrogenaattoreiden on kyettävä toimimaan laajalla taajuus- ja jännitealueella määrätyn ajan massiivisen syötön eroonkytkeytymisen ehkäisemiseksi. Toisaalta järjestelmien

tahattoman saarekekäytön suojaus voi perustua taajuus- ja jännitevalvontaan ja saareke-tilanteet on tunnistettava laitteiston irrottamiseksi verkosta tuotantolaitteiston ja verkkoon kytkettyjen laitteiden vaurioitumisen ehkäisemiseksi. (SFS-EN 50438 2015)

Edellä mainittu laaja suojausasettelujen taajuus- ja jännitealue sekä aktiivinen tehovaste taajuuspoikkeamille vaikeuttavat tahattoman saarekesyötön ilmaisu. Tahattomien saarekesyöttötilanteiden voidaan todeta liittyvän tilanteisiin, jossa sähkön kulutus ja tuotanto ovat riittävästi tasapainossa. Mikäli laitteistossa on käytössä taajuuspoikkeamien kompensointiin tarkoitettu aktiivinen tehovaste, kasvaa tahattomien saarekekäyttöjen todennäköisyys etenkin laajoilla suojausasetteluilla. (SFS-EN 50438 2015)

Hajautettu tuotanto aiheuttaa jakeluverkon kannalta haastavia tilanteita suojauksen suunnittelun ja toimivuuden kannalta. Suojaukseen liittyvien laitteistojen tulee toimia kaikissa mahdollisissa vikatilanteissa moitteitta sähkön laadun ja turvallisuuden takaamiseksi. Keski-jännitejohtolähdöt on varustettu maasulku- ja oikosulkuviat havaitsevilla suojareleillä. Sähköaseman syöttökentän suojarele toimii suojana kiskossa tapahtuvien vikojen varalta sekä johtolähtöjen varasuojana. Hajautetun tuotannon liittymispisteet on varustettava suojareleiden kanssa samankaltaisilla suojaustoiminnoilla. (Mäki 2007) Mikro-tuotantokohteiden suojaus on yleensä toteutettu verkkoinvertterin yhteyteen ja sille on asetettu vaatimukset Energiategollisuuden verkostosuosituksessa, joka käsittelee mikro-tuotannon liittämistä jakeluverkkoon. (Energiategollisuus 2016b).

Perinteisesti hajautetun tuotannon suojaukset perustuvat jännitteen ja taajuuden poikkeamien tarkasteluun tuotannon liittymispisteessä. Liittymispisteen tilaa voidaan tarkastella lisäksi pätö- ja loistehon suhdetta valvomalla. Suojausasettelut voidaan vapaasti määritellä mitattavien suureiden laukaisurajaan sekä aikaportaisiin perustuen. Tuotantolaitteiston suojaukseen kuuluu myös ylivirtasuojaus, joka on voitu toteuttaa releistyksellä tai sulakkeilla. Liittymispisteen ominaisuuksista riippuen myös maasulkusuojauksen toteuttaminen voi olla tarpeellista. Peruseriaatteeksi hajautettujen tuotantolaitosten suojaukselle voidaan johtaa periaate, jonka mukaan suojauksen tulisi toimia aina liittymispistettä syöttävän sähköasemakatkaisijan tai alemman suojausportaan suojauksen, kuten pienjänniteverkon sulakkeen lauetessa. (Mäki 2007)

Hajautettujen tuotantokohteiden keskeinen suojausmenetelmä on edellisten lisäksi syöttävän verkon jännitteen häviämisen seurauksena toimiva saarekekäytönestosuojaus. Saarekekäytönestosuojaus tunnetaan yleisesti nimellä Loss of Mains –suojaus (LoM). Tämä on keskeisessä roolissa niin kutsuttujen ei-toivottujen saarekekäyttöjen (anti-islanding) ehkäisyssä. (Mäki 2007) Ei-toivottujen saarekekäyttöjen on todettu muutamien vikataposten perusteella olevan keskeisessä roolissa jakeluverkon turvallisuuden takaamiseksi niin verkossa työskentelevien asentajien kuin asiakkaiden näkökulmasta.

Energiategollisuuden mikro-tuotannon jakeluverkkoon liittämistä käsittelevässä verkostosuosituksessa on yksiselitteisesti todettu, ettei mikro-tuotantolaitteisto saa kytkeytyä verk-

koon, mikäli verkon jännite tai taajuus ei ole tuotantolaitoksen sallitulle toiminnalle asetteluissa rajoissa vähintään määrätyn havaintoajanjakson ajan. Tuotantolaitoksen suojauksen tulee toimia siten, että laitteisto lakkaa syöttämästä verkkoon, kun seuraavassa taulukossa 4 esitetyistä asetteluarvoista poiketaan. Taulukon 4 arvot perustuvat standardiin EN 50438. (Energiateollisuus 2016b)

Taulukko 4. Mikrotuotantolaitoksen suojauksen asetteluarvot. (Energiateollisuus 2016b)

Parametrit	Toiminta-aika	Asetteluarvo
Ylijännite	0,2 s	$U_n + 10 \%$
Alijännite	0,2 s	$U_n - 15 \%$
Ylitaajuus	0,2 s	51,5 Hz
Alitaajuus	0,2 s	47,5 Hz
Saarekekäytönestosuojaus (LoM)	<5 s	

Taulukkoa 4 vastaavat arvot ovat voimassa myös Energiateollisuuden sähköntuotantolaitoksen verkkoon liittämistä käsittelevällä tuotantolaitosten teknisiä vaatimuksia käsittelevän ohjeen (Energiateollisuus 2016c) teknisellä liitteellä 1 (Energiateollisuus 2016d), joka käsittelee nimellistehoaltaan alle 100 kVA suuruisen sähköntuotantolaitoksen liittämistä jakeluverkkoon. Myös Saksan mikrotuotantonormin VDE-AR-N-4105 mukaiset laitteistot soveltuvat kytkettäväksi jakeluverkkoon Suomessa. (Energiateollisuus 2016d)

Suojauslaitteiston toiminnan seurauksena jakeluverkosta irronnut tuotantolaitteisto saa kytkeytyä takaisin verkkoon vasta, kun verkon jännite ja taajuus ovat pysyneet taulukossa 4 esitettyjen suojauksen asetteluarvojen mukaisissa rajoissa standardissa SFS-EN50438 määritetyn minimiajan 60 sekuntia (Energiateollisuus 2016d)

Yli 100 kVA:n tuotantokohteita koskevat vaatimukset on esitetty teknisellä liitteellä 2. Nimellistehoaltaan 100...500 kVA olevien tuotantolaitosten tapauksessa suojausasettelut tulee määrittää tapauskohtaisesti siten, että ne noudattelevat liitteen vaatimuksia ja tarvittaessa verkkoyhtiön asettamia vaatimuksia. Nimellistehoaltaan yli 500 kVA olevien tuotantolaitosten suojausasetteluista tulee aina sopia erikseen verkonhaltijan kanssa, koska ne voivat aiheuttaa sähköverkkoon merkittäviä paikallisia ilmiöitä ja niillä on suurina määrinä lisäksi mahdollisia yhteisvaikutuksia sähkönjakeluun valtakunnallisella tasolla. (Energiateollisuus 2016e)

Verkostosuosituksessa YA9:13 viitattu standardi EN 50438 on kumottu vuoden 2019 helmikuussa, mutta Energiateollisuuden verkostosuositusta ei ole vielä päivitetty viittaamaan standardin EN 50438 korvanneeseen standardiin EN50549. Tässä diplomityössä on

käytetty verkkoyhtiöiden ja kuluttajien toimintaa käytännössä ohjaavaa energiateollisuuden ohjeita tuotannon liittämistä jakeluverkkoon sekä verkostosuositusta YA9:13, joka käsittelee mikrotuotannon liittämistä jakeluverkkoon.

Aiemmin tehtyjen tarkastelun rajausten perusteella on syytä keskittää huomiota etenkin invertterin kautta tehoa verkkoon syöttävien laitteistojen suojaukseen. Mikrotuotantokohteille on ominaista verrattain pieni, suuruusluokaltaan yleensä enintään muutamia kymmeniä kilovolttiampeereita oleva nimellisteho, joka on kytköksissä laitteiston syöttämän vikavirran suuruuteen. Tässä luvussa tarkastellaan tarkemmin hajautettujen tuotantolaitteistojen aiheuttamia ei-toivottuja saarekekäyttöjä, jotka voivat olla seurausta sähköverkon vikatilanteista tai suunnitelluista sähkönjakelun keskeytyksistä. Verkon jällenkytkentätilanteita on syytä tarkastella erikseen, koska mikrotuotantolaitteistojen voidaan todeta aiheuttavan ongelmia pikajälleenkytkentätilanteissa (Energiateollisuus 2016b).

3.4.1 Oikosulkuvirrat

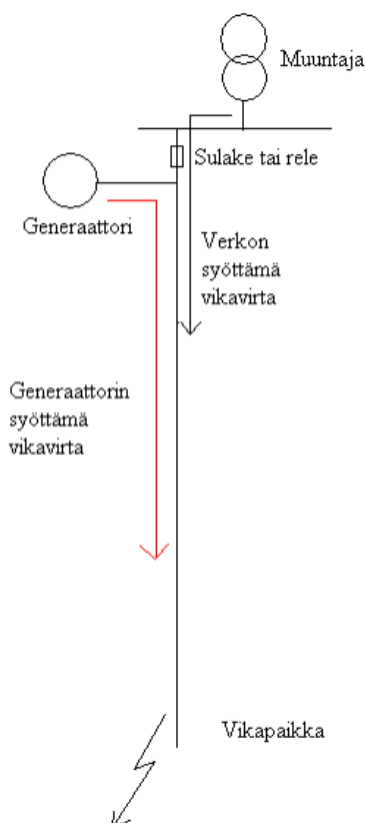
Oikosulkuvikatilanteissa hajautettu tuotanto nostaa vikapaikan lähistöltä mitattavia oikosulkuvirtoja, koska tuotantolaitos kykenee syöttämään vikapaikkaa sähköasemalta tulevan syötön lisäksi. Ääritilanteissa kasvaneet vikavirrat voivat aiheuttaa haasteita komponenttien oikosulkuvirrankestoisuudelle. Hajautettu tuotanto voi lisäksi hidastaa keskijännitejohtolähtöä syöttävän suojareleen toimintaa, mikäli suojaus ei havahdu vikaan suunnitellussa ajassa. (Mäki 2007)

Tavalla, jolla tuotantolaitos on liitetty verkkoon, on merkitystä suojauksen toimimisen kannalta. Jakeluverkon kanssa rinnan käyvä tahtigeneraattori kykenee syöttämään vikavirtaa huomattavasti epätahtigeneraattoria pidempään. Epätahtikoneet puolestaan eivät kykene syöttämään merkittävää vikavirtaa pitkiä aikoja, mutta niiden syöttämä transientin aikainen vikavirta on tahtigeneraattoreita korkeampi, mutta pienenee nopeasti transientin jälkeen. Suojauksen havahtuminen ja oikea-aikainen toimiminen ovat tärkeitä tekijöitä sähköön laadun varmistamiseksi. (Mäki 2007)

Myös verkon ja tuotantolaitteiston rajapinnassa toimivia inverttereitä voidaan pitää yhden tyyppisinä generaattoreina. Inverttereiden sisäänrakennetut ominaisuudet rajoittavat syötetyn vikavirran suuruutta ja vikavirran suuruus jääkin huomattavasti pyöriviä koneita pienemmäksi. Käytännössä invertterin syöttämän vikavirran suuruus on nimellisvirran suuruinen tai hieman sitä suurempi. (Mäki 2007)

3.4.2 Suojauksen sokaistuminen

Suojauksen sokaistumisella tarkoitetaan tilannetta, jossa suojalaitteen ja vikapaikan välillä sijaitseva hajautettu tuotantolaitos syöttää oikosulkuviassa vikavirtaa siten, ettei lähtöä suojaava rele tai sulake toimi suunnitellusti syötön kautta kulkevan vikavirran pienentyttyä. (Mäki 2007) Suojauksen sokaistumista on havainnollistettu kuvassa 8.



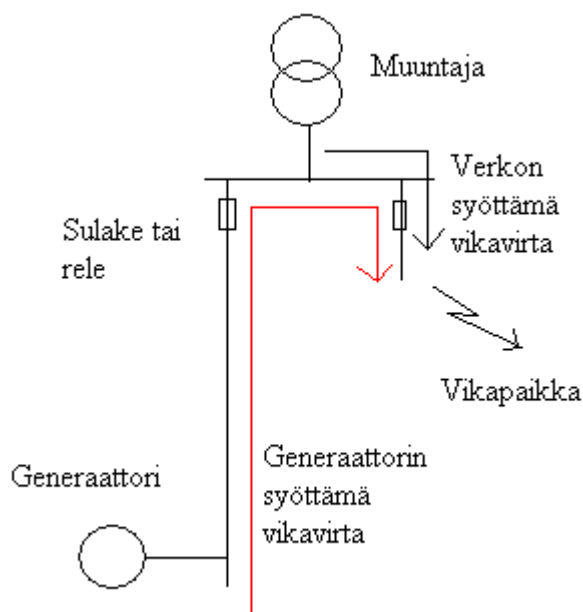
Kuva 8. Suojauksen sokaistuminen oikosulkuvian aikana. (Lehto 2009)

Suojauksen sokaistumista ei voida pitää todennäköisenä suojauksen toimintaa häiritsevässä tilanteena enintään yhden megawatin suuruisten pientuotantokohteiden tapauksessa keskijänniteverkossa. Suojauksen sokaistuminen vaatisi tapahtuakseen suurta vikavirtaa pitkään syöttävän tahtigeneraattorin, jonka nimellisteho on merkittävästi tällä hetkellä jakeluverkkoon asennettua vastaavaa pientuotantokohdetta suurempi. Kuitenkin useat verkkoon liitetyt pientuotantokohteet voivat aiheuttaa sopivissa olosuhteissa suojauksen sokaistumisen.

Pienjänniteverkkoon yleisesti liitetyt invertteriliitännäiset aurinkosähköjärjestelmät ovat yksittäin sijoitettuna luvussa 2 esitettyjen nimellistehojen perusteella liian heikkotehoisia aiheuttaakseen suojauksen sokaistumisen. Ongelmia suojauksen toiminnan hidastumisen tai sokaistumisen kanssa voi kuitenkin ilmetä, mikäli yksittäiselle pienjännitelähdölle on liitettynä useita pientuotantokohteita. Pienjänniteverkkoon kytketyt mikrotuotannoksi luokiteltavia merkittävästi suuremmat pientuotantolaitteistot on yleensä liitetty omalle pienjännitelähdölleen yksittäin jo pelkästään liittymän vaatiman suuremman sulakekoon vuoksi.

3.4.3 Epäselektiivinen laukaisu

Hajautettu tuotantolaitos voi aiheuttaa suojauksen virhelaukaisun eli epäselektiivisen laukaisun, mikäli se syöttää viereisellä keskijännitejohtolähdöllä tai pienjännitelähdöllä sijaitsevaa vikapaikkaa myös vikaan nähden toisen suojuareleen tai sulakkeen läpi ja aiheuttaa suojauksen virheellisen toiminnan. (Mäki 2007) Epäselektiivistä laukaisua on havainnollistettu kuvassa 9.



Kuva 9. Vikavirran kulku epäselektiivisen laukaisun yhteydessä. (Lehto 2009)

Virhelaukaisua ei voida pitää todennäköisenä suojauksen toimintaa häiritsevänä tilanteena enintään yhden megawatin suuruisten pientuotantokohteiden tapauksessa keskijänniteverkossa. Jotta epäselektiivinen suojauksen toiminta voisi toteutua keskijänniteverkossa, tulisi merkittävän määrän pientuotantoa sijaita sähköisesti lähellä sähköasemaa. Suunnatun ylivirtasuojan käyttäminen keskijänniteverkon suojauksessa ehkäisee epäselektiivisen laukaisun toteutumista keskijänniteverkossa.

Luvun 3.4.2 tapaan virhelaukaisu olisi varsin epätodennäköinen myös pienjänniteverkossa verkkoon tällä hetkellä yleisesti liitettyjen tuotantokohteiden ominaisuuksien perusteella. Kuitenkin suuri määrä lähdölle liitettyjä pientuotantokohteita sekä vallitsevan kulutustason ylittävä sekä lähtöä suojaavan sulakkeen nimellisvirran ylittävä tuotantotaso voi aiheuttaa virhelaukaisun, mikäli vikaantunutta lähtöä suojaava sulake ei toimi riittävän nopeasti.

3.4.4 Ei-toivottu saarekekäyttö

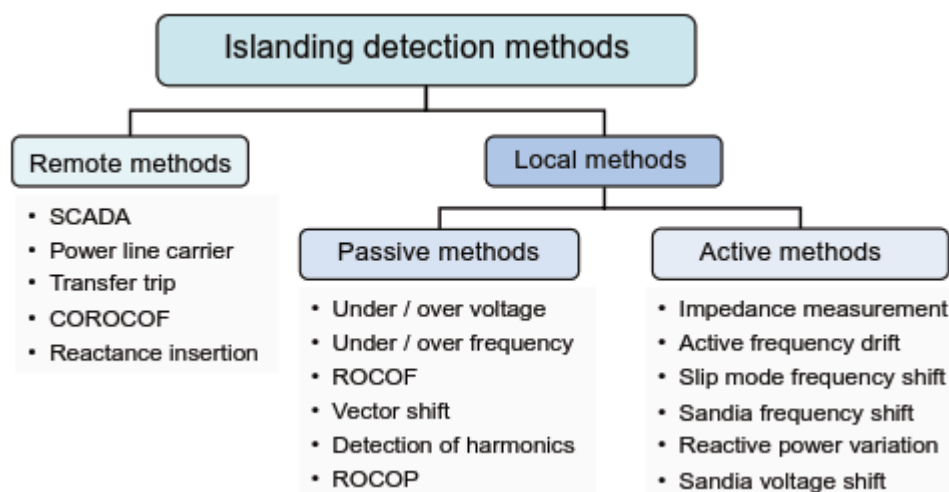
Loss of Mains (LOM) –suojauksen tarkoitus on ehkäistä tilanteita, joissa tuotantolaitos jää syöttämään tiettyä verkon osaa eli saareketta tilanteessa, jossa yhteys syöttävään verkkoon katoaa. Ei-toivotut saarekekäytöt johtuvat usein epäonnistuneista jälleenkytkennöistä, mutta voivat olla seurausta mistä tahansa syötön katkaisevan kytkinlaitteen toiminnasta joko vian tai kytkinlaitteen ohjauksen seurauksena. Nämä tilanteet voivat aiheuttaa turvallisuusriskin sähköverkossa työskenteleville henkilöille tai vaurioita sähköverkon komponentteihin tai asiakkaiden laitteisiin ja ovat siksi erityisen vaarallisia. (Mäki 2007)

Hajautetuksi tuotannoksi luokiteltavat voimalaitokset on varustettava LOM-suojauksella, jonka täytyy luotettavasti ja nopeasti erottaa hajautetun tuotantolaitoksen tilanteessa, jossa voimalaitos on jäänyt syöttämään ei-toivottua saareketta. Nykyään yleisesti käytössä olevat LOM-suojausmenetelmät eivät kuitenkaan kykene havaitsemaan ei-toivottua saareketta tilanteessa, jossa kulutuksen ja tuotannon tasot ovat tasapainotilanteessa. Tätä tilannetta kutsutaan NDZ-tilanteeksi (Non-Detection Zone). Suojauksen sokean alueen laajuus riippuu monesta tekijästä, kuten LOM-suojausmenetelmästä, tuotantolaitoksen tyypistä ja ohjaustavasta ja suojausasetteluista. NDZ-alueen laajuutta voidaan rajoittaa tiukentamalla suojausasetteluita, jolloin esimerkiksi jännitekuopat aiheuttavat tarpeettomia tuotantolaitosten irtikytkeytymisiä. Tuotantolaitosten irtikytkeytymiset voivat aiheuttaa laajassa mittakaavassa ongelmia sähköjärjestelmän tehotasapainoon. Raipala on väitöskirjassaan (2018) tarkastellut kirjallisuuteen perustuen uusia LOM-suojausmenetelmiä, joilla suojauksen toimivuutta voidaan parantaa. (Raipala 2018) Käytännössä uusien LOM-suojausmenetelmien kaupallistaminen ja soveltaminen eri tuotantomuotoihin ja kokoluokkiin kuuluviin tuotantolaitoksiin vaatii aikaa. Lisäksi oman haasteensa aiheuttavat eri teholuokkiin kuuluviin tuotantolaitoksiin kohdistuvat suojausvaatimukset ja muut VJV-vaatimukset.

Nimellisteholtaan alle 100 kVA suuruisen tuotantolaitoksen tulee irrota verkosta taulukossa 4 esitetyn mukaisesti 5 sekunnissa syöttävän verkon jännitteen häviämisestä. Nimellisteholtaan yli 100 kVA suuruisten pientuotantokohteiden suojausasetteluista täytyy tarvittaessa sopia erikseen verkonhaltijan kanssa. On syytä huomioda, että taulukossa 3 esitetty 5 sekunnin vaatimus tuotantolaitteiston irtoamisesta syöttävän verkon jännitteen häviämisestä laskien on huomattavasti Suomessa käytössä olevia automaattisten pikajälleenkytkentöjen (PJK) ja aikajälleenkytkentöjen (AJK) aika-asetteluita pidempi. Tästä seuraa tilanne, jossa pientuotantolaitos saattaa sopivan tuotannon ja kulutuksen tasapainon vallitessa jäädä syöttämään saareketta, mikäli muut suojauksen toiminnot eivät havahdu ja irrota laitosta verkosta.

Ei-toivotun saarekekäytön havaitsemiseen ja LOM-suojauksiin voidaan käyttää joko paikallisia tai kommunikointiin perustuvia menetelmiä. Kuvassa 10 on esitetty Raipalan muodostama LOM-suojausmenetelmien jaottelu. Kaukokäyttöiset menetelmät perustuvat

tietoliikenteeseen tai verkkoa pitkin mittauksen avulla ei-toivotun saarekekäyttötilanteen estäviin sovelluksiin. Käytännössä tuotantolaitokselle voidaan vikatilanteessa erottaa verkosta kauko-ohjaussignaalia hyödyntäen. Tietoliikenteeseen perustuvien suojausmenetelmien voidaan todeta olevan paikallisia menetelmiä tehokkaampia, koska ne eivät perustu tuotantokohteen liittymispisteen paikallisiin mittauksiin, jolloin NDZ-ongelmalta voidaan välttyä. (Raipala 2018) Fingrid vaatii Suomessa yli 1 MW:n kohteille toteutettavaksi tietoliikenteeseen perustuvan eroonkytkennän viestiyhteyden, josta käytetään lyhennettä EVY (Fingrid Oyj 2019). Jakeluverkkoon liitetyn hajautetun pientuotannon suojaukset perustuvat useimmiten voimassa olevien standardien sekä Energiategollisuuden suositusten mukaisesti liittymispisteeseen sijoittuviin, tuotantolaitteiston omiin suojaustoimintoihin, joten riski ei-toivottujen saarekekäyttöjen syntymiseen on tunnistettavissa.



Kuva 10. LOM-suojausmenetelmien luokittelu tyypeittäin. (Raipala 2018)

Tuotantolaitteiston liittymispisteeseen sijoitettavat paikalliset LOM-suojauksen menetelmät voidaan jakaa passiivisiin ja aktiivisiin menetelmiin. Suojauksissa perinteisesti käytettäviin passiivisiin menetelmiin kuuluvat ali- ja ylijännitteeseen sekä ali- ja ylitaajuuteen perustuvat suojausmenetelmät, taajuuden muutosnopeuteen perustuva ROCOF-menetelmä, jännitteen jaksonajan muutoksiin perustuva Vector shift -menetelmä, harmonisiin yliaaltoihin perustuva suojausmenetelmä, sekä tehon muutosnopeuteen perustuva ROCOP-menetelmä. Passiivinen saarekekäytönestosuojaus perustuu verkosta paikallisesti mitattavien arvojen seuraamiseen. Aktiiviset menetelmät perustuvat verkkoon syötettäviin pieniin häiriösignaaleihin ja mitattavaan verkon häiriöihin reagoivaan vastukseen. Useimmat aktiiviset LOM-suojauksen menetelmät perustuvat taajuuden muutoksen havaitsemiseen tilanteessa, jossa syntyy ei-toivottu saarekekäyttö. Aktiivinen LOM-suojaus voi perustua myös loistehon muutokseen ei-toivotun saarekekäyttötilanteen seurauksena. Syntynyt saareke voidaan havaita loistehoon perustuen varsin hitaasti, joten kyseinen menetelmä soveltuu lähinnä suojauksen varajärjestelmäksi. (Raipala 2018)

Useat invertteriteknologiaan perustuvat hajautettua pientuotantoa edustavat voimalaitokset on varustettu ROCOF-suojaukseen perustuvalla LOM-suojauksella. Esimerkiksi verkkoyhtiö Caruna suosittelee ROCOF-suojauksen käyttämistä jakeluverkkoon liitettyjen tuotantolaitteistojen tarkennettuja vaatimuksia käsittelevässä dokumentissaan. (Caruna Oy 2019). Myös asiantuntijoiden kanssa käydyn keskustelun perusteella ROCOF-suojaus on yleisesti käytetty LOM-suojauksen menetelmä. Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV2018) määrittävät, että taajuuden muutosnopeuteen perustuvaa LOM-suojauksausta saa käyttää ainoastaan voimalaitoksissa, joiden nimellisteho on alle 50 kW ja suojaus saa toimia vasta mitattuaan asetellun suojausrajan ylittävää taajuuden muutosnopeutta vähintään 500 millisekunnin ajan. Fingrid suosittelee käytettäväksi taajuuden ja jännitteen mittaukseen perustuvaa suojausmenetelmää. (Fingrid Oyj 2018) Yleisesti käytetyt pikajälleenkytkentäajat ovat määritellyn 500 millisekunnin mittausjaksoon nähden liian nopeita, mikä voi heikentää LOM-suojauksen toimintaa vikatilanteissa.

3.4.5 Jälleenkytkentätilanteet

Automaattisia jälleenkytkentöjä käytetään jakeluverkoissa ei-pysyvien maa- ja oikosulkuvikojen poistamiseen. Käytännössä tämä tarkoittaa johtolähtöä suojaavan katkaisijan aukeamista lyhyeksi ajanjaksoksi, jonka aikana tilastollisesti noin 90% vioista poistuu. Vikaantuneelle lähdölle liitetty hajautettu tuotantolaitos voi aiheuttaa ongelman, mikäli sen syöttämä vikavirta pitää yllä jännitettä vikapaikassa ja syöttää vikavirtaa oikosulussa. Vika voi jäädä pysyväksi, mikäli valokaari vikapaikassa ei sammu jälleenkytkennän jännitteettömänä aikana. (Mäki 2007)

Epäonnistuneet jälleenkytkennät heikentävät verkon luotettavuutta pysyvien vikojen määrän lisääntyessä. Samalla jännitteen laatuongelmat lisääntyvät ja komponentteihin kohdistuva rasitus lisääntyy. Epäonnistuneet jälleenkytkennät aiheuttavat rasitusta myös verkkoon liitetuille tuotantolaitteistoille. Tuotantolaitteisto voi irrota verkosta jälleenkytkennän aikana sen oman suojauksen toimiessa alkuperäisen vian seurauksena. Viimeistään tuotantolaitteiston tulisi kuitenkin irrota verkosta saarekekäytönestosuojauksen toimissa. Mikrotootantolaitteistojen osalta on standardin EN 50438 mukaisesti säädetty, että saarekekäytönestosuojauksen tulee irrottaa mikrotootantolaitteisto syöttävästä verkosta alle 5 sekunnin kuluessa, kuten taulukossa 4 on esitetty.

Yleisen tavan mukaisesti verkkoyhtiöt ottavat suojausten suunnittelussa huomioon suojattavalle johtolähtölle liitetyn tuotannon määrän, jonka seurauksena tapauksesta riippuen pikajälleenkytkennät tai kaikki jälleenkytkennät voidaan jättää asettelematta käyttöön. Fingridin voimalaitosten järjestelmätekniisten vaatimusten (VJV2018) mukaan taajuuden muutosnopeuteen perustuva suojalaite saa irrottaa voimalaitoksen verkosta, mikäli suojausrajan ylittävää muutosnopeutta on mitattu 500 millisekunnin ajan. Tämä aikavaatimus voi aiheuttaa tilanteita, joissa voimalaitos ei irtoa verkosta pikajälleenkytkennän aikana.

3.4.6 Maasulkutilanteet

Hajautettujen tuotantolaitteistojen ei todeta osallistuvan maasulkuvikatilanteisiin yhtä merkittävässä määrin kuin oikosulkuvikatilanteisiin. Maasulkutilanteissa tuotantolaitteistojen voidaan olettaa kytkeytyvän irti verkosta viimeistään LOM-suojauksen toimimisen seurauksena. (Mäki 2007) Maasulkutilanteita ei ole nähty tarpeelliseksi käsitellä tarkemmin tässä diplomityössä.

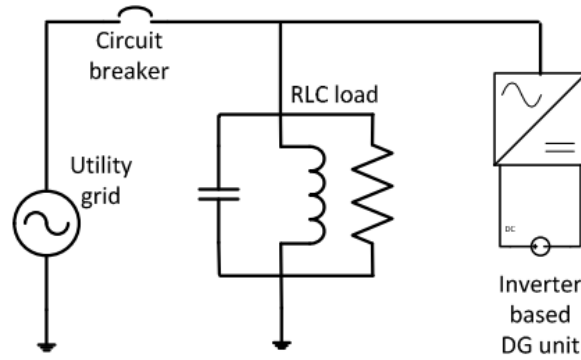
4. SIMULOINTIYMPÄRISTÖN MÄÄRITTELY

Tässä luvussa on kuvattu diplomityön osana suoritettujen simulointien PSCAD-malli, joka on laadittu noudatellen aiemmin luvussa 3 tehtyjä tarkasteltavien tilanteiden rajauksia. Simuloitavien tilanteiden selkeyttämiseksi ja toistettavuuden mahdollistamiseksi käytettävää jakeluverkon mallia on yksinkertaistettu verrattuna todelliseen jakeluverkkoon. Simuloinneilla on mahdollista tarkastella verkkoon liitettyjen mikro- ja pientuotantokohteiksi luokiteltavien hajautettujen voimalaitosten jakeluverkkoon aiheuttamia ilmiöitä. Lähtötilanteeksi on aiemmin määritelty tilanne, jossa syöttävän verkon jännite häviää jakeluverkon kytkinlaitteen avautumisen seurauksena.

4.1 Loss of mains -tilanteiden ominaispiirteet

LOM-tilanteet on aiemmin tässä työssä määritelty simulaatioiden avulla suoritettavan tarkastelun kohteeksi. Simuloinneilla on tarkoitus mallintaa pientuotannoksi luokiteltavien hajautettujen tuotantokohteiden käyttäytymistä ja ei-toivottujen saarekekäyttötilanteiden syntyä. Invertterin avulla pienjännitteiseen jakeluverkkoon liitetyt pientuotantokohteet on varustettu usein ROCOF-menetelmään perustuvalla LOM-suojauksella. Asiantuntijoiden kanssa käydyn keskustelun perusteella LOM-tilanteet voidaan riittävällä tarkkuudella havaita käyttämällä voimalaitosten järjestelmätekniisten vaatimustenkin (VJV2018) mukaista jännitteen ja taajuuden mittaukseen perustuvaa suojausmenetelmää.

LOM-suojausmenetelmät perustuvat yleisimmin sähköisten suureiden, kuten jännitteen ja taajuuden muutoksen havaitsemiseen. Nämä muutokset voidaan useimmin havaita, kun syöttävän verkon jännite häviää ja tuotanto ja kulutus ovat epätasapainossa pätö- ja loiste-
tehon osalta. Tämän ilmiön tarkasteluun voidaan käyttää yksinkertaista testipiiriä, jollainen on esitetty kuvassa 11. Piiri koostuu katkaisijalla erotettavissa olevasta syöttävästä verkosta, RLC-kuormasta sekä invertterin kautta verkkoon liitetystä hajautetun tuotannon yksiköstä. (Raipala et al. 2016)



Kuva 11. Saareketilanteen mallintamiseen käytetty yksinkertainen piiri. (Raipala et al. 2016)

Kuvassa 11 esitetyn katkaisijan ollessa avoinna ja syöttävän verkon ollessa erotettuna RLC-kuorman ja hajautetun tuotannon muodostamasta piiristä, on piirin pätö- ja loistehon tuotannon sekä kulutuksen oltava tasapainossa kaavojen (1) ja (2) mukaisesti. (Raipala et al. 2016)

$$P_{INV} = 3 \frac{V_{ph}^2}{R} = P_{LOAD} \quad (1)$$

$$Q_{INV} = 3V_{ph}^2 \left(\frac{1}{2\pi fL} - 2\pi fC \right) = Q_{LOAD}, \quad (2)$$

joissa P_{INV} on invertterin pätöteho, V_{ph} on vaihejännite, R on kuormituksen resistanssi, P_{LOAD} on kuormituksen pätöteho, Q_{INV} on invertterin loisteho, f on taajuus, L on induktanssi, C on kapasitanssi ja Q_{LOAD} on kuorman loisteho. Kaavasta (1) voidaan lukea, että vaihejännite V_{ph} on verrannollinen siirtyvän pätötehon määrään. Vaihejännitteen ollessa riippuvainen siirretystä tehosta sekä kuorman resistiivisistä komponentista, loistehon ja taajuuden välillä voidaan todeta olevan yhteys kaavan (2) mukaisesti. (Raipala et al. 2016) Muutokset tuotannon ja kulutuksen välisessä tehotasapainossa johtavat jännitteen ja taajuuden muutoksiin, joihin saarekekäytönestosuojauksen mahdollinen toimiminen perustuu. Simulointiympäristöön ei ole nähty tarpeelliseksi mallintaa erikseen LOM-suojausmenetelmää, koska muutokset invertterimallin verkkoliityntäpisteen jännitteessä ja taajuudessa johtavat ideaalisesti mallinnettavan suojauksen toimimiseen käytettäessä standardien mukaista suojausta.

Simulointimallissa syöttävän verkon pisteestä tai hajautusta tuotantoyksiköstä kuormalle jakeluverkon kautta siirtyvä pätö- ja loisteho määritetään malliin asetettavan mittauksen perusteella, jolloin säädettävissä olevan kuorman tehoarvoja ei tarvitse erikseen määrittää laskennallisesti. Näin tuotannon sekä kulutuksen välinen tehotasapaino voidaan asettaa mahdollisimman tarkasti mallinnetun piirin mukaiseksi.

4.2 Simuloitavan verkon topologia

Simulaatioissa käytettävä verkkomalli on yksinkertaistettu esitys keskijännitteisen jakeluverkon osasta. Verkkomallin topologian suunnittelussa on pyritty ottamaan huomioon erilaiset verkon tuotanto- ja kuormitustilanteet, jotka ovat käyttäjän säädettävissä. Simulointiympäristö on perustilanteessa rajattu kanta- tai suurjännitteisen jakeluverkon pisteestä syötettyyn sähköaseman päämuuntajaan, jonka perään on liitetty katkaisijan kautta syötetty kolme ideaalista jakelumuuntajaa sisältävä keskijännitejohtolähdön osa. Verkkomalli on suunniteltu skaalautuvaksi, joten jakelumuuntajien määrää ja samalla mallinnettavan verkon osan laajuutta voidaan muuttaa tarpeen mukaan. Pienjänniteverkon komponentteja ei ole erikseen mallinnettu, vaan ne on oletettu sisältyviksi jakelumuuntajan syöttämään säädettävään kuormitukseen.

Simulointiympäristön jakeluverkon komponentit ovat häviöttömiä eli ideaalisia, mutta keskijänniteverkon johto-osat voidaan tarpeen mukaan kuvata ilmajohto- tai maakaapeli-komponenteilla, joiden sähköiset ominaisuudet vastaavat jakeluverkossa yleisesti käytettyjä johdintyyppejä. Simulointiympäristö on luotu silmällä pitäen mahdollisuutta todentaa ei-toivotun saarekekäyttötilanteen syntyminen ideaalisessa verkossa. Saarekekäyttötilanteen mahdollisuutta voidaan tämän jälkeen tarkastella jakeluverkossa, jossa keskijänniteverkon johto-osat on mallinnettu sähköisiltä ominaisuuksiltaan todellista vastaavilla osilla.

4.3 Simuloitavan verkon PSCAD-malli

Simuloinneissa hyödynnetään PSCAD 4.6.3 Professional -ohjelmistoa, joka on tarkoitettu graafisen käyttöliittymän avulla mallinnettavien piirien tarkasteluun. Ohjelmistoa käyttäen voidaan tarkastella sähköverkossa tapahtuvia transienttitilanteita aikatasossa. (PSCAD 2019) Simuloinneissa käytetty verkkomalli koostuu varsinaisesta jakeluverkosta sekä voimalaitosmallista, joka voidaan sijoittaa käyttäjän haluamiin verkon pisteeseen. Voimalaitos on kytketty nimellijännitteeltään 0,4 kV:n pienjänniteverkkoon invertterin avulla.

4.3.1 Jakeluverkon malli

PSCAD-ohjelmistoon on luotu aiemmin luvussa 4.2 kuvatun mukaisesti yksinkertainen keskijännitteisen jakeluverkon malli, joka on esitetty kuvassa 12. Jakeluverkko on skaalautuva ja tähän diplomityöhön liittyvissä simuloinneissa verkkoon on liitetty kolme jakelumuuntajaa, jotka syöttävät kiinteitä kuormia. Verkkoa syöttää kanta- tai alueverkon liityntäpistettä kuvaava 110 kV:n ideaalinen jännitelähde, johon on kytketty sähköverkossa yleisesti käytetyn kokoinen sähköaseman päämuuntajaa kuvaava 16 MVA:n päämuuntaja. Syöttävän verkon impedanssia ei ole mallinnettu simuloinneissa. Keskijänni-

Taulukko 5. Simulointiympäristössä käytetyt muuntajakomponentit.

Muuntaja	Muuntosuhde [U_1/U_2]	Nimellisteho [MVA]
PM1	110 / 21	16
M1	21 / 0,4	1
M2	21 / 0,4	2
M3	21 / 0.4	1

Jakeluverkon johto-osat on perustilanteessa mallinnettu ideaalisiksi ja tarpeen mukaan kullekin johto-osalle voidaan liittää todellisen johto-osan sähköisten ominaisuuksien mukaan määritelty komponentti. Johto-osaa kuvaavat komponentit on luotu keskijännitteisessä jakeluverkossa yleisesti käytettäville AHXAMK-W 3x240 ja ACSR 54/93 (Raven) -johto-osille käyttäen PSCAD-ohjelmiston Coupled PI -mallia. Simuloinneissa käytetyt johto-osien sähköiset ominaisuudet on esitetty kuvissa 13 ja 14. Johto-osien oletuspituudeksi on valittu 700 metriä, joka kuvaa riittävällä tasolla jakelumuuntamoiden välistä etäisyyttä keskijänniteverkossa.

Positive Sequence	
+ve Sequence Resistance	0.15 [ohm/km]
+ve Sequence Inductive Reactance	0.110 [ohm/km]
+ve Sequence Capacitive Reactance	0.01061033 [Mohm*km]
Zero Sequence	
Zero Sequence Resistance	0.954 [ohm/km]
Zero Sequence Inductive Reactance	0.44 [ohm/km]
Zero Sequence Capacitive Reactance	0.01082532 [Mohm*km]

Kuva 13. AHXAMK-W 3x240-kaapelin impedanssien arvot syötettynä PSCAD-ohjelmiston Coupled PI -malliin. (Kauhaniemi et al. 2005)

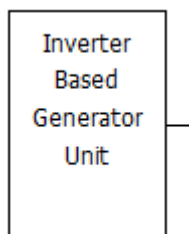
Positive Sequence	
+ve Sequence Resistance	0.535 [ohm/km]
+ve Sequence Inductive Reactance	0.368 [ohm/km]
+ve Sequence Capacitive Reactance	0.318309886 [Mohm*km]
Zero Sequence	
Zero Sequence Resistance	0.685 [ohm/km]
Zero Sequence Inductive Reactance	1.899 [ohm/km]
Zero Sequence Capacitive Reactance	0.521819486 [Mohm*km]

Kuva 14. ACSR 54/9 eli Raven -ilmajohdon impedanssit syötettynä PSCAD-ohjelmiston Coupled PI -malliin. (Kauhaniemi et al. 2005)

4.3.2 Invertterin malli

Simulointiympäristössä käytettävän invertterin mallina on käytetty SGEM-tutkimusohjelmassa luodun PSCAD-mallikirjaston osaksi Vaasan yliopistossa muodostettua yksinkertaisen, verkon kanssa rinnankäyvän invertterin mallia. PSCAD-mallilla voidaan kuvata invertterin kautta jakeluverkkoon liitettyä voimalaitosta. Invertterin osaksi ei ole erikseen mallinnettu suojaustoimintoja, mutta sitä voidaan käyttää tarkasteltaessa invertterin toimintaa tilanteissa, joissa jakeluverkon vikatilanne on ohimenevä. (Kauhaniemi 2012)

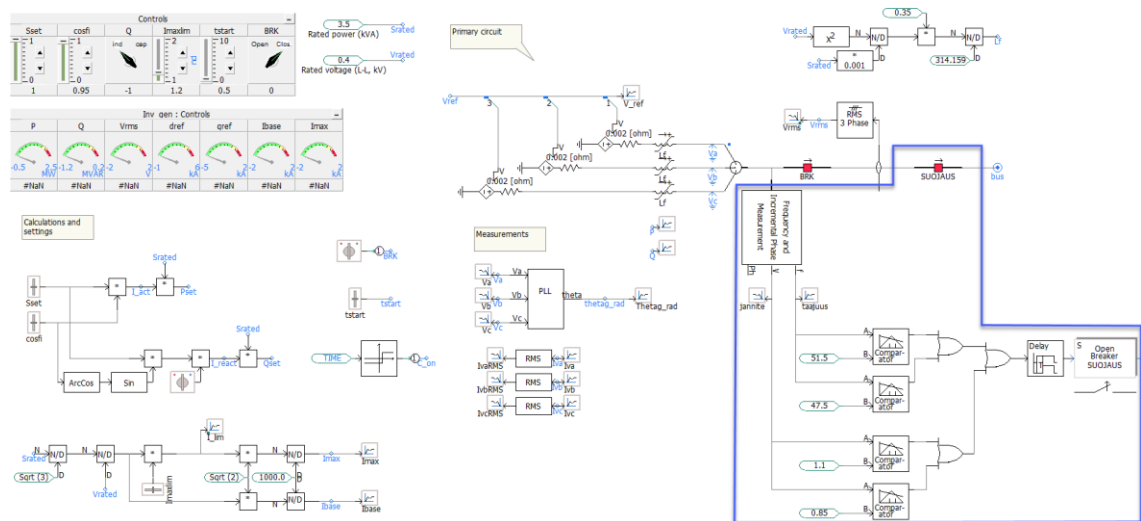
Invertterimalli liitetään haluttuun verkkomalliin kuvassa 15 esitetyllä moduulilla, joka on yhdistetty invertterin verkkoliityntään. Moduulin verkkoon syöttämä teho on käyttäjän määriteltävissä malliin kuuluvien asetusten kautta. Tarvittaessa myös invertterin verkkoon syöttämän virran taso voidaan asettaa halutulle tasolle. Invertterimalli on suunniteltu siten, että sen nimellisteho ja -jännitetaso voidaan skaalata käyttötarkoitukseen sopivalle tasolle. Mikäli invertterimallin nimellistehoa tai jännitetasoa muutetaan, on muutokset otettava huomioon myös invertterin syöttämän jakelumuuntajan määrittelyissä. Invertterimallia ei ole täysin testattu kaikilla nimellistehon ja -jännitteen arvoilla, joten säätöpiirin arvoja on mahdollisesti muutettava, mikäli malli ei käyttäydy oikein. (Kauhaniemi 2012) Invertterimalli on kuvan 12 jakeluverkkomallissa liitetty jakelumuuntajan M3 syöttämää muuntopiiriä kuvaavaan pienjännitekiskoon.



Kuva 15. Verkkomalliin liitettävä invertterimoduuli.

Invertterimalli koostuu kolmesta osiosta, joita ovat primääripiiri ja virran- sekä tehonsäätöön tarkoitetut piirit. Invertterimalli perustuu säädettäviin jännitelähteisiin ja sen yksityiskohtainen malli on esitetty kuvassa 16. Invertteri on erotettavissa sen syöttämästä verkkomallista katkaisijalla, jolle on toteutettu myös mallin ohjauksessa tarvittavat pätö- ja loistehon mittaukset. Mallin vasemmasta yläreunasta löytyy ohjauspaneeli, jonka kautta voidaan määritellä kuhunkin simulointitilanteeseen sopivat arvot. (Kauhaniemi 2012) Tähän diplomityöhön liittyvissä simuloinneissa ei ole tehty muutoksia invertterin primääripiiriin, säätöpiireihin tai niiden asetuksiin.

SGEM-tutkimusohjelmassa laadittuun invertterimallin verkkoliityntään on lisätty tässä diplomityössä tehtäviä simulointeja varten ideaalinen suojauslogiikka, joka voidaan asettaa vastaamaan haluttuja jännitteen ja taajuuden arvoihin perustuvia suojausten arvoja. Kuvaan lisätty suojauslogiikka on merkitty kuvaan 17 sinisellä korostuksella. Suojauslogiikka on voimakkaasti yksinkertaistettu ja tarkkailee ainoastaan invertterin verkkoliitynnän jännitteen ja taajuuden arvoa PSCAD-ohjelmiston valmiin mittauskomponentin avulla. Suojauslogiikkaan ei ole erikseen mallinnettu LOM-suojausta, koska jännitteen ja taajuuteen perustuvien ideaalisten suojausten on oletettu havaitsevan syöttävän verkon jännitteen häviäminen riittävällä tarkkuudella.



Kuva 17. SGEM-tutkimusohjelmassa luotuun invertterin malliin lisätty suojauslogiikka korostettuna sinisellä.

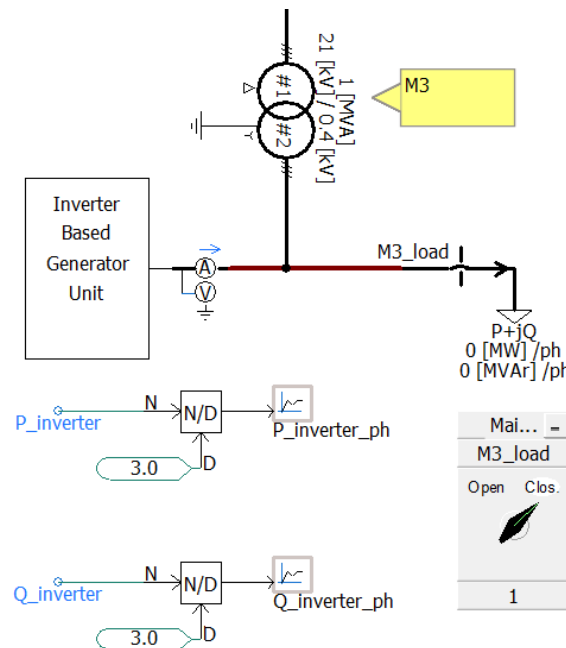
Invertterimalliin lisätyn suojauslogiikan suojausten asetteluarvot syötetään kunkin komparaattorin sisääntuloon B liitetyn muuttujan arvoon. Taajuuden arvot syötetään asettelu-arvoja vastaaviin muuttujiin sellaisinaan ja jännitteen arvot suhteellisarvoina. Invertterin verkkoliitynnästä mitattua taajuuden tai jännitteen arvoa verrataan suojausten asettelu-arvoon ja ylärajan ylittyminen tai alarajan alittuminen johtaa laukaisukäskyn välittymiseen invertterin suojausta kuvaavalle katkaisijalle. Laukaisukäsky on viivästetty suojausten toiminta-aikaa kuvaavalla viive-elementillä, jonka arvo voidaan syöttää komponentin ominaisuuksiin sekunteina.

Alkuperäiseen invertterimalliin sisältyvä muuntajakomponentti on lisäksi siirretty ylemmään, luvussa 4.3.1 esitellyyn sivumoduuliin, joka kuvaa keskijännitteistä jakeluverkkoa. Alkuperäinen muuntajakomponentti on käytännössä vastannut jakelumuuntajaa, koska se on muuntanut invertterin syöttämän 0,4 kV:n tasoisen pienjännitteen keskijännitteen tasolle arvoon 20 kV. Siirto on perusteltua, jotta invertterin kautta verkkoon liitettyä hajautetuksi pientuotannoksi luokiteltava voimalaitos voidaan kytkeä jakelumuuntajan syöttämään pienjännitteiseen jakeluverkkoon, johon voidaan liittää myös kulutusta.

5. HAJAUTETUN VERKKOON AIHEUTTAMAT ILMIÖT ERI VERKKOMALLEISSA

Tässä luvussa esitellään aiemmin määritellyssä simulointiympäristössä tarkastellut simulointitilanteet ja niitä vastaavat simulointitulokset. Simuloinnit on suoritettu ensin ideaalisella verkkomallilla, jonka jälkeen mallin keskijännitteiset johto-osat on korvattu jakeluverkossa yleisesti käytetyillä maakaapelilla tai ilmajohtoa mallintavilla komponenteilla. Verkkomalliin kytketyn tuotantolaitoksen kytkeytymispaikkaa ja nimellistehoa S_{max} sekä tuotantolaitoksen kokoa vastaamaan aseteltua säädettävän kuormakomponentin kytkeytymispaikkaa on muutettu mahdollisimman kattavien simulointitulosten keräämiseksi. Verkkoon liitettävän voimalaitoksen nimellisteho on määritetty siten, että se vastaa diplomityössä aiemmin tehtyä pientuotantokohteen määritelmää.

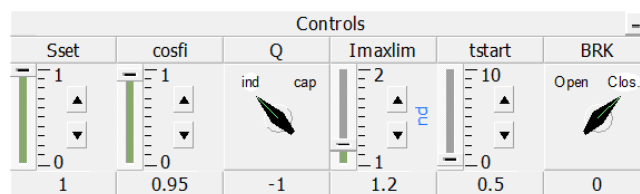
Jokaiseen muuntopiiriin on liitetty pienjänniteverkon katkaisijakomponentin kautta säädettävissä oleva kuormakomponentti. Muuntopiiriin liitettävissä oleva voimalaitoksen malli kytketään pienjänniteverkkoon erillisen mittauskomponentin kautta, jotta verkkoon syötetyn pätö- ja loistehon arvot voidaan selvittää kuormakomponentin arvojen asettamiseksi tuotantoa vastaavalle tasolle. Kuvassa 18 on esitetty jakelumuuntajan M3 syöttämä pienjänniteverkko, johon on liitetty mittauskomponentin kautta simuloinneissa käytetyn voimalaitoksen malli sekä pienjännitekatkaisijan kautta säädettävä kuormakomponentti.



Kuva 18. Simulointiympäristön muuntopiiriin M3 malli.

Mallinnetun voimalaitoksen verkkoon syöttämän pätö- ja loistehon tarkat arvot saadaan muutettua kuormakomponentille sopiviksi vaihekohtaisten tehojen arvoiksi jakamalla invertteriltä verkkoon syötetyn kokonaistehon arvot kolmella. Kaikissa simulointitilanteissa invertterin tehokertoimeksi on asetettu arvo 0,95, jotta verkkoon liitettävä kuormitus saadaan karkeasti vastaamaan todellista tilannetta. ja käynnistymisajaksi arvo 0,5 s. Mallinnettuun jakeluverkkoon liitetään kerrallaan ainoastaan nimellisteholtaan toisiaan vastaavia voimalaitosta sekä kuormitusta mallintavia komponentteja simulointitilanteiden määrän rajoittamiseksi. Kuvasta 18 on lisäksi nähtävissä kuorman kytkeytymistä ohjaavan katkaisijan ohjauskytkin, jonka avulla kuormat voidaan kytkeä kunkin simulointitilanteen kannalta sopiviin muuntopiireihin.

Kaikki simuloinnit on suoritettu siten, että PSCAD-ohjelmiston asetuksista simulointiajan pituudeksi on asetettu aika 6,0 s. Simulointitilanteessa invertteri on asetettu käynnistymään ajanhetkellä 0,5 s ja sähköaseman katkaisijaa kuvaava komponentti on ajastettu aukeamaan automaattisesti ajanhetkellä 2,0 s. Invertterin ohjauspaneelin asetukset on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Invertterin ohjauspaneelin asetukset simulointitilanteissa.

Invertterin suojausten asetteluarvot on kaikissa simulointitilanteissa aseteltu vastaamaan taulukossa 4 esitettyjä arvoja, jotka määrittävät mikrotuotantolaitoksilta vaaditut suojaukset. Samoja suojausasetteluita on käytetty kaikilla tarkastelluilla voimalaitoksen nimellistehon arvoilla simulointien yksinkertaistamiseksi. Suojausten voidaan olettaa toimivan riittävällä tarkkuudella kaikissa simulointitilanteissa tarkasteltaessa ei-toivotun saarekkeen syntymahdollisuutta esimerkiverkossa. Diplomityön liitteisiin on lisätty jokaista simulointitilannetta vastaavat verkkoa syöttävän sähköasemakatkaisijan J01 jännitteen sekä pätö- ja loistehon mittaukset ja invertterin suojausten mittaustulokset jännitteen ja taajuuden osalta. Näistä liitteistä voidaan tarkastella mitattujen suureiden aikatazon kuvaajaa kunkin simuloinnin ajalta.

5.1 Ideaalinen verkkomalli

Tässä luvussa on tarkasteltu hajautetun pientuotannon vaikutuksia ideaaliseksi mallinnetussa jakeluverkon osassa. Ideaalisella verkkomallilla tehtävillä simuloinneilla pyritään verifioimaan saarekkeen syntymahdollisuus esimerkiverkossa aiemmin kuvassa 11 esitetyn saareketilanteen tarkasteluun käytettävän yksinkertaisen testipiirin tapaan. Eri simulointitilanteet on lueteltu taulukossa 6. Eri kytkentätilanteita on mallinnettu säädettä-

vän kuormakomponentin sekä voimalaitoksen paikkaa muuttamalla. Eri tehoisten voimalaitosten verkkoon aiheuttamia ilmiöitä on mallinnettu yksittäisen voimalaitoksen nimellisteho S_{max} säätämällä on pyritty mallintamaan valitsemalla yksittäisen voimalaitoksen nimellistehon arvoja tasaisesti pientuotannoksi luokiteltavien voimalaitosten nimellistehoalueelta. Nimellistehot on esitetty aiemmin tehdystä määritelmästä poiketen simuloinneissa käytetylle invertterimallille sopivassa muodossa näennäistehoina.

Taulukko 6. *Ideallisella verkkomallilla tarkastellut simulointitilanteet.*

#	Voimalaitoksen kytkeytyminen	Voimalaitoksen nimellisteho S_{max} [kVA]	Kuorman kytkeytyminen	Johto-osien malli
1	M3	5	M3	Ideaalinen
2	M3	5	M1	Ideaalinen
3	M3	20	M3	Ideaalinen
4	M3	20	M1	Ideaalinen
5	M3	200	M3	Ideaalinen
6	M3	200	M1	Ideaalinen
7	M3	1000	M3	Ideaalinen
8	M3	1000	M1	Ideaalinen
9	M1, M3	20	M1, M3	Ideaalinen
10	M1, M3	20	M2, M3	Ideaalinen
11	M1, M3	20	M2	Ideaalinen

Jokaista simulointitilannetta vastaava simulointi on suoritettu kahdesti mahdollisten poikkeamien havaitsemiseksi ja luotettavaksi havaitut tulokset on esitetty taulukossa 7. Taulukossa 7 esitetty verkkoon sijoitettujen mittausten arvot on luettu ennen katkaisijan J01 ajastettua aukeamista ajanhetkellä 1,8 s, jolloin invertteri on käynnistynyt. Eri simulointitilanteita vastaavat sähköasemakatkaisijan J01 mittaukset sekä invertterin suojauksen mittaukset on esitetty aikatasossa liitteessä B. Katkaisijalta J01 mitatut tehot on esitetty pätötehon osalta kilowatteina ja loistehon osalta kilovolttiampeereina. Katkaisijalta J01 mitattu keskijänniteverkon jännite on esitetty kilovoltteina. Invertterin suojauksen jännite on esitetty suhteellisarvona ja taajuus hertseinä. Kuvaajia muodostettaessa on käytetty PSCAD-ohjelmiston toimintoa, joka sovittaa kuvaajan akselit mitattuun signaaliin, minkä vuoksi tarkasteltaessa on syytä huomata, etteivät kuvaajien y-akselit ole simulointitilanteiden välillä toisiaan vastaavia.

Simulointitilanteissa 9-11 kullekin mainitulle jakelumuuntajalle on liitetty nimellisteholtaan taulukon 6 mukainen voimalaitos ja mainituille jakelumuuntajille voimalaitoksen nimellisteho vastava kuormitus. Taulukossa 7 esitetty voimalaitosten ja kuormien tehot on esitetty verkkoon liitettyjen komponenttien kokonaistehoina. Simulointitulosten osana on esitetty tieto stabiilin saarekkeen syntymahdollisuudesta, jolla tarkoitetaan sitä, että kytkeytykö invertteri irti verkosta sen yhteyteen mallinnetun suojauksen toiminnan seurauksena.

Taulukko 7. *Ideaalisen verkkomallin simulointitilanteita vastaavat arvot ajanhetkellä 1,8 s sekä tulokset.*

#	P_{gen} [kW]	Q_{gen} [kVAr]	P_{load} [kW]	Q_{load} [kVAr]	P_{J01} [kW]	Q_{J01} [kVAr]	Stabiili saareke
1	4,75	-1,56	4,75	-1,56	0,04	-0,01	kyllä
2	4,75	-1,56	4,75	-1,56	0,04	-0,01	kyllä
3	18,99	-6,25	18,99	-6,25	0,16	0,01	kyllä
4	18,99	-6,25	18,99	-6,25	0,18	0,00	kyllä
5	188,52	-62,45	188,52	-62,45	1,56	-0,52	kyllä
6	188,52	-62,45	188,52	-62,45	3,90	4,96	ei
7	914,96	-312,25	914,96	-312,25	7,80	-2,66	ei
8	914,96	-312,25	914,96	-312,25	60,03	133,56	ei
9	37,97	-12,49	37,97	-12,49	0,31	-0,10	kyllä
10	37,97	-12,49	37,97	-12,49	0,32	-0,05	kyllä
11	37,97	-12,49	37,97	-12,49	0,36	-0,02	kyllä

Taulukosta 7 voidaan havaita, että tarkastelluissa simulointitilanteissa stabiili saareke muodostui aina, kun verkkoon liitettyä voimalaitosta vastaava kuorma oli liitetty samaan muuntopiiriin voimalaitoksen kanssa. Saareketta ei saatu muodostumaan muuntopiiriin M3 kytketyillä nimellistehoilla 200 kVA ja 1000 kVA suuruisilla voimalaitoksilla simulointitilanteissa 6 ja 8, kun kuorma oli kytketty muuntopiiriin M1. Myös simulointitilanteen 7 voidaan tulkita olevan epästabiili, koska taajuuden arvo on epävakaata ja liitteen B simulointitilannetta vastaavasta kuvaajasta luettavissa oleva heilahtelu voimistuvaa. Saadun tuloksen voidaan olettaa johtuvan verkossa tuntemattomasta syystä aiheutuvista häviöistä. Muuntajakomponenttien mallintamisessa käytetyn positiivisen sekvenssin vuotoreaktanssin voidaan olettaa vaikuttavan muuntajan käyttäytymiseen muuntajan läpi siirretyn tehon kasvaessa. Simulointitilanteessa 8 katkaisijan J01 kautta verkkoon syötetty pätöteho ja loisteho ovat huomattavan suuret verrattuna tilanteeseen 7, jossa nimellistehoilla 1000 kVA:n voimalaitos on liitetty samaan muuntopiiriin sitä vastaavan kuormituksen kanssa.

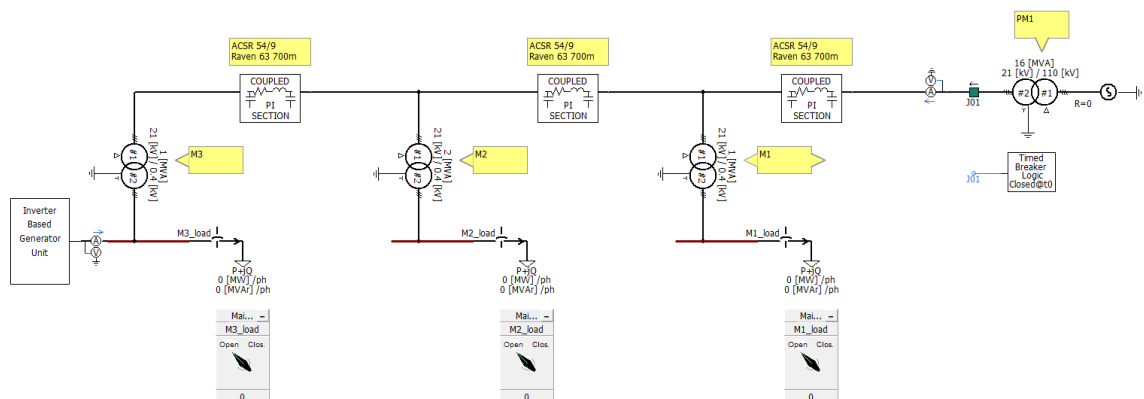
Tuloksista voidaan lukea, että katkaisijan J01 läpi verkkoon syötettyjen tehojen suuruus noudattelee varsin tarkasti verkkoon liitetyn voimalaitoksen nimellistehon suuruusluokkaa. Tuotannon ja kulutuksen välisen tehotasapainon kannalta olisi ideaalista, ettei syöttävästä verkosta siirry tehoa saarekkeen muodostumisen osalta tarkasteltavaan verkon osaan. Diplomityön simuloinneissa käytetyn tehotasapainon määrittämiseen käytetty invertterin verkkoon syöttämän tehon mittaukseen perustuva menetelmä osoittautui simulointien aikana hieman epätarkaksi, kuten taulukosta 7 voidaan lukea. Kuorman arvon säätäminen käsin vastaamaan voimalaitoksen sekä katkaisijan J01 verkkoon syöttämää kokonaistehoa ei vaikuttanut simulointitilanteiden 6 ja 8 lopputulokseen. Yksi tähän vaikuttava tekijä voi olla käytetyn kuormakomponentin epäideaalisessa käyttäytymisessä.

Kuorman verkosta ottaman tehon havaittiin simulointien aikana poikkeavan hieman sille asetetuista arvoista.

Taulukon 7 tuloksia ja liitteen B kuvaajia tarkastelemalla voidaan havaita, ettei verkkoon liitetyn voimalaitoksen nimellisteholla ole merkittävää vaikutusta saarekkeen syntyyn tilanteessa, jossa kuormitus on kytketty voimalaitoksen kanssa samaan muuntopiiriin. Taajuuden kuvaajissa on havaittavissa invertterin käynnistymisestä johtuva piikki ajanhetkellä 0,5 s. Taajuuden poikkeaman keskijänniteverkkoa syöttävän katkaisijan J01 aue- tessa ajanhetkellä 2,0 s voidaan kuitenkin havaita kaikissa simulointitilanteissa kasvavan voimalaitoksen nimellistehon kasvaessa. Simulointitilanteissa 6 ja 8, joissa stabiiliin saarekkeen muodostuminen ei ollut mahdollista, invertterille rakennetun suojauksen toimi- minen 0,2 sekunnin suojausviiveen kuluessa voidaan havaita invertterin suojauksen taa- juuden kuvaajista. Kun invertteri kytkeytyy irti jakeluverkosta, alkaa sen taajuus nousta kohti arvoa 60 Hz ja jännite kohti arvoa 2 pu, mikä on oletettavasti selitettävissä invert- terin ohjauksen toiminnalla. Invertterin toiminnalla suojauksen toimimisen ja simulointi- malliin lisätyn invertterin sisäisiä suojauksia mallintavan katkaisijan aukeamisen jälkeen ei ole merkitystä työn tulosten kannalta.

5.2 Ilmajohtoverkkomalli häviöt huomioimatta

Ilmajohtoverkon tai osittain maakaapeloidun verkkomallin keskijänniteverkon johdot on mallinnettu Raven-tyyppisillä johto-osilla. Muilta osin verkkomalli vastaa ideaalisesti mallinnettua verkkomallia. Mallinnetun keskijänniteverkon osan pienuuden sekä simu- lointitulosten kattavuuden varmistamiseksi osittain maakaapeloitua verkkomallia on pää- dytty mallintamaan puhtaalla ilmajohdolla. Käytännössä keskijänniteverkon maakaape- lointia ei kaikkien johtolähtöjen osalta tulla tekemään säävarmaa verkkoa rakennettaessa täydellisesti, jolloin johtolähdöille voi jäädä ilmajohtohaaroja, joita tämä malli simuloi. Kuvassa 20 on esitetty osittain maakaapeloidun keskijänniteverkon mallintamiseen käy- tetty PSCAD-malli.



Kuva 20. Ilmajohdosta koostuvan keskijänniteverkon PSCAD-verkkomalli.

Taulukossa 8 on esitetty ilmajohtoverkkomallin tapauksessa tarkastellut simulointitilanteet. Ilmajohtoverkon osalta on päädytty tarkastelemaan yhden verkkoon liitetyn voimalaitoksen tapauksessa edellisessä luvussa 5.1. tarkastellun mukaisia tilanteita. Simulointien edetessä kävi ilmi, ettei saarekkeen muodostuminen ollut ilmajohtoverkossa mahdollista simulointitilanteiden 9-11 mukaisissa tapauksissa, joten tarkastelu suoritettiin tilanteissa, jossa jokaiseen muuntopiiriin on liitettynä voimalaitos ja sitä vastaava kuormitus. Hajautetun pientuotannon yleistyessä tuotannon määrän kasvu on jo aiheuttanut tilanteita, joissa keskijänniteverkon osan jokaiseen muuntopiiriin on liitettynä hajautettua tuotantoa.

Taulukko 8. Ilmajohtoverkkomallissa tarkastellut simulointitilanteet.

#	Voimalaitoksen kytkeytyminen	Yhden voimalaitoksen nimellisteho S_{\max} [kVA]	Kuorman kytkeytyminen	Johto-osien malli
12	M3	5	M3	ACSR 54/9
13	M3	5	M1	ACSR 54/9
14	M3	20	M3	ACSR 54/9
15	M3	20	M1	ACSR 54/9
16	M3	200	M3	ACSR 54/9
17	M3	200	M1	ACSR 54/9
18	M3	1000	M3	ACSR 54/9
19	M3	1000	M1	ACSR 54/9
20	M1, M2, M3	20	M1, M2, M3	ACSR 54/9
21	M1, M2, M3	1000	M1, M2, M3	ACSR 54/9

Taulukossa 8 esitettyjä simulointitilanteita 12-21 vastaavat arvot ja simulointien tulokset on esitetty taulukossa 9. Arvojen määrittelyssä ei ole huomioitu johto-osissa tapahtuvia pätö- ja loistehohäviöitä, jotta simulointimallin käyttäytymistä voidaan tarkastella laajemmin. Jokaista simulointitilannetta vastaavat sähköasemakatkaisijan J01 mittaukset sekä invertterin suojauksen mittaukset on esitetty aikatasossa liitteessä C.

Taulukko 9. Ilmajohdoverkkomallin simulointitilanteita vastaavat arvot ajanhetkellä 1,8 s sekä tulokset.

#	P_{gen} [kW]	Q_{gen} [kVAr]	P_{load} [kW]	Q_{load} [kVAr]	P_{J01} [kW]	Q_{J01} [kVAr]	Stabiili saareke
12	4,75	-1,56	4,75	-1,56	0,04	-2,92	ei
13	4,75	-1,56	4,75	-1,56	0,04	-2,92	ei
14	18,98	-6,25	18,98	-6,25	0,16	-2,96	ei
15	18,98	-6,25	18,98	-6,25	0,17	-2,92	ei
16	188,52	-62,45	188,52	-62,45	1,56	-3,43	ei
17	188,52	-62,45	188,52	-62,45	2,93	0,60	ei
18	914,96	-312,25	914,96	-312,25	7,80	-5,57	ei
19	914,96	-312,25	914,96	-312,25	39,87	92,72	ei
20	56,95	-18,74	56,95	-18,74	0,47	-3,06	ei
21	2744,88	-936,75	2744,88	-936,75	23,30	-10,85	ei

Ilmajohdoverkkomallilla stabiilin saarekkeen muodostuminen ei ollut mahdollista käytetyssä simulointiympäristössä taulukon 9 mukaisilla komponenttien arvoilla. Taulukosta 9 voidaan lukea, että pienellä kuormituksella lähes tyhjäkäyvän keskijännitteisen ilmajohdoverkon tuottama loisteho on suuri verrattuna invertterille asetettuun nimellistehoon sekä valittuun tehokertoimeen ja siten invertterin tuottaman loistehon määrään nähden. Edellä kuvattu tilanne vastaa yleisesti jakeluverkossa esiintyvää tilannetta, jossa keskeytysalueeseen kuuluu keski- ja pienjännitteistä jakeluverkkoa ja loistehon kompensointi on toteutettu keskitetysti, eikä tarkasteltavalle verkon osalle ole sijoitettuna hajautettua kompensointia. Taulukkoon 9 kirjattuja arvoja on myöhemmin hyödynnetty luvussa 5.4 tarkastelluissa simulointitilanteissa, joiden määrittelyssä on huomioitu tarkasteltavan verkon osan tuottaman loistehon kompensointi sekä johto-osilla tapahtuvat pätötehohäviöt.

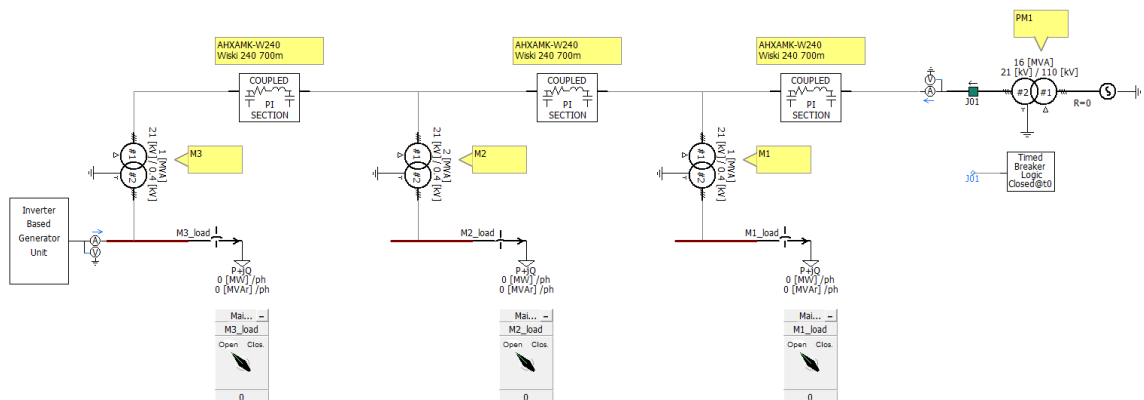
Simulointitilanteissa 20 ja 21 tutkittiin erikseen tilannetta, joissa jokaiseen muuntopiiriin M1-M3 on liitettyä voimalaitos ja sen tuotantoa vastaava kuorma. Simuloinnit tehtiin sekä yleisesti tulevaisuuden pientuotannon kuluttajalaitteiston kokoluokkaa vastaavalla 20 kVA nimellisteholla, että pientuotannon ylärajalle sijoittuvan 1000 kVA voimalaitoksen tehoilla. Taulukosta 9 voidaan lukea, etteivät mallinnettuun verkkoon ole pätö- ja loistehon osalta tehotasapainossa tuotannon ja kulutuksen osalta, koska katkaisijan J01 läpi siirtyy pätö- ja loistehoa. Kummassakaan simulointitilanteessa saarekkeen muodostuminen ei ollut mahdollista, koska keskijänniteverkkoa syöttävän katkaisijan J01 aukeamisen seurauksena invertterin jännitteessä ja taajuudessa tapahtuu muutoksia, jotka johtavat suojauksen toimimiseen.

Tässä luvussa saatujen simulointitulosten perusteella voidaan todeta, että juuri verkkoon liitetyn tuotannon ja kulutuksen tehotasapainosta poikkeaminen vaikuttaa negatiivisesti

saarekkeen syntymahdollisuuksiin. Johtopäätöksenä simulointituloksien perusteella voidaan todeta, että keskijänniteverkon kapasitiiviset ominaisuudet vaikuttavat saarekkeen syntymahdollisuuksiin heikentävästi.

5.3 Maakaapeloitu verkkomalli häviöt huomioimatta

Maakaapeloidun verkkomallin keskijänniteverkon kaapelit on mallinnettu Wiski 240 -tyyppisillä johto-osilla. Johto-osat vastaavat käytännössä vahvaa kaupunkiverkkoa, mikä parantaa simulointitulosten monipuolisuutta. Simuloinneissa käytetty verkkomalli on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Maakaapeloidun keskijänniteverkon verkkomalli PSCAD-ohjelmistossa.

Taulukossa 10 on esitetty maakaapeloidun verkkomallin tapauksessa tarkastellut simulointitilanteet. Myös maakaapeloidun verkkomallin osalta on päädytty tarkastelemaan usean verkkoon liitetyn voimalaitoksen osalta tilanteita, jossa jokaiseen muuntopiiriin on liitettyä voimalaitos ja sitä vastaava kuormitus.

Taulukko 10. Maakaapeloidussa verkkomallissa tarkastellut simulointitilanteet.

#	Voimalaitoksen kytkeytyminen	Yhden voimalaitoksen nimellisteho S_{max} [kVA]	Kuorman kytkeytyminen	Johto-osien malli
22	M3	5	M3	AHXAMK-W 3x240
23	M3	5	M1	AHXAMK-W 3x240
24	M3	20	M3	AHXAMK-W 3x240
25	M3	20	M1	AHXAMK-W 3x240
26	M3	200	M3	AHXAMK-W 3x240
27	M3	200	M1	AHXAMK-W 3x240
28	M3	1000	M3	AHXAMK-W 3x240
29	M3	1000	M1	AHXAMK-W 3x240
30	M1, M2, M3	20	M1, M2, M3	AHXAMK-W 3x240
31	M1, M2, M3	1000	M1, M2, M3	AHXAMK-W 3x240

Taulukossa 10 määriteltyjä simulointitilanteita 22-31 vastaavat arvot ja simulointien tulokset on esitetty taulukossa 11. Arvojen määrittelyssä ei ole huomioitu johto-osissa tapahtuvia pätö- ja loistehohäviöitä, jotta simulointimallin käyttäytymistä voidaan tarkastella laajemmin. Jokaista simulointitilannetta vastaavat sähköasemakatkaisijan J01 mittaukset sekä invertterin suojauksen mittaukset on esitetty aikatasossa liitteessä D.

Taulukko 11. *Maakaapeloidun verkkomallin simulointitilanteita vastaavat arvot ajanhetkellä 1,8 s sekä tulokset.*

#	P_{gen} [kW]	Q_{gen} [kVAr]	P_{load} [kW]	Q_{load} [kVAr]	P_{J01} [kW]	Q_{J01} [kVAr]	Stabiili saareke
22	4,75	-1,56	4,75	-1,56	0,05	-87,35	ei
23	4,75	-1,56	4,75	-1,56	0,05	-87,35	ei
24	18,98	-6,25	18,98	-6,25	0,18	-87,39	ei
25	18,98	-6,25	18,98	-6,25	0,19	-87,35	ei
26	188,52	-62,45	188,52	-62,45	1,69	-87,90	ei
27	188,52	-62,45	188,52	-62,45	3,00	-83,91	ei
28	914,98	-312,25	914,98	-312,25	8,42	-90,21	ei
29	914,98	-312,25	914,98	-312,25	39,53	7,37	ei
30	56,95	-18,74	56,95	-18,74	0,51	-87,50	ei
31	2744,95	-936,75	2744,95	-936,75	25,16	-95,91	ei

Kokonaan maakaapeloidussa verkossa stabiilin saarekkeen muodostuminen ei ollut mahdollista käytetyssä simulointiympäristössä. Tyhjäkäyvän, vahvan maakaapeloidun keskijänniteverkon tuottaman loistehon määrä on kaikissa simulointitilanteissa huomattavasti suurempi kuin invertterille sille asetetun nimellistehon ja tehokertoimen perusteella tuottaman loistehon määrä. Maakaapeloidun verkon tapauksessa käytännössä tyhjäkäyvien keskijänniteverkon johto-osien tuottama loisteho on invertterin tuottamaa loistehoa suurempi kaikilla valituilla invertterin nimellistehon arvoilla lukuunottamatta 1000 kVA:n voimalaitosta. Verkkomalli vastaa edellisen luvun tapaan tilannetta, jossa kompensointi on toteutettu pääosin keskitetysti, eikä mallinnetulle verkon osalle ole sijoitettuna hajautettua kompensointia. Taulukkoon 11 kirjattuja arvoja on myöhemmin hyödynnetty luvussa 5.4 tarkastelluissa simulointitilanteissa, joiden määrittelyssä on huomioitu tarkasteltavan verkon osan tuottaman loistehon kompensointi sekä johto-osilla tapahtuvat pätöteho- ja loistehohäviöt.

Stabiilin saarekkeen muodostuminen ei ollut mahdollista yhdessäkään maakaapeloidun verkon simulointitilanteessa, jossa johto-osien pätöteho- ja loistehohäviöitä ja loistehon kompensointia ei ole toteutettu hajautetusti. Taulukosta 11 voidaan lukea, että käytetyn simulointiympäristön tyhjäkäyvän keskijänniteverkon tuottaman loistehon suuruus on noin 90 kVAr. Simulointituloksia 28 ja 29 vertaamalla voidaan todeta, että kuormitetun keskijänniteverkon tuottama loisteho on huomattavasti pienempi kuin tyhjäkäyvän verkon. Simulointi-

lanteessa 29 maakaapeloitu keskijänniteverkko on lähempänä luonnollisen tehon tilanetta kuin simulointitilanteessa 28, jolloin maakaapeliverkon tuottaman loistehon suuruus on pienempi.

5.4 Johto-osien pätö- ja loistehohäviöt huomioiva verkkomalli

Tässä luvussa on esitelty simulointitulokset edellisissä luvuissa 5.2 ja 5.3 esitettyjä simulointitilanteita 13, 15, 17, 19, 23, 25, 27 ja 29 vastaavat simuloinnit, jotka on suoritettu siten, että mallinnetussa keskijänniteverkossa siirretyn tehon suuruuden seurauksena syntyvät pätö- ja loistehohäviöt on huomioitu muuntopiiriin M1 kytketyn kuorman arvojen asettelussa. Simulointitilanteita, joissa muuntopiiriin kytketyn hajautetun pientuotannon verkkoon syöttämä teho kulutetaan muuntopiirissä, ei ole nähty tarpeelliseksi toistaa, koska ideaalisen verkkomallin simulointitulosten voidaan katsoa osittain kattavan nämä tilanteet, mikäli verkkoon on liitettyä hajautettua kompensointia tyhjäksiäyvä verkon tuottamaa loistehoa vastaava määrä. Simulointitilanteet on esitetty taulukossa 12 ja niitä vastaavat simulointien tulokset on esitetty taulukossa 13. Jokaista simulointitilannetta vastaavat sähköasemakatkaisijan J01 mittaukset sekä invertterin suojauksen mittaukset on esitetty aikatasossa liitteessä E.

Taulukko 12. Ilmajohtoverkossa ja maakaapeloidussa verkossa tarkastellut simulointitilanteet pätö- ja loistehohäviöt huomioiden.

#	Voimalaitoksen kytkeytyminen	Yhden voimalaitoksen nimellisteho S_{max} [kVA]	Kuorman kytkeytyminen	Johto-osien malli
32	M3	5	M1	ACSR 54/9
33	M3	20	M1	ACSR 54/9
34	M3	200	M1	ACSR 54/9
35	M3	1000	M1	ACSR 54/9
36	M3	5	M1	AHXAMK-W 3x240
37	M3	20	M1	AHXAMK-W 3x240
38	M3	200	M1	AHXAMK-W 3x240
39	M3	1000	M1	AHXAMK-W 3x240

Lukujen 5.2 ja 5.3 perusteella voitiin todeta, ettei saarekkeen syntyminen ole mahdollista, mikäli verkossa tapahtuvia pätö- ja loistehohäviöitä vastaavia muutoksia muuntopiiriin M1 kytketyn kuorman arvojen asettelussa ei ole tehty. Näiden asettelumuutosten voidaan katsoa todellisessa tilanteessa olevan mahdollisia, mikäli pätö- ja loistehotasapaino on ennen yhteyden katkeamista syöttävään verkkoon päin. Arvojen määrittelyssä on hyödynnetty lukujen 5.2 sekä 5.3 simulointituloksia siten, että katkaisijan J01 ajanhetkellä 1,8 s mitaamat arvot on vähennetty kuormakomponentin pätö- ja loistehokomponenteista. Tämän jälkeen simulointitilanteessa tarkasteltavan verkon osan tehotasapaino on aseteltu iteratiivista menetelmää käyttäen taulukossa 13 esitetyn mukaisiksi.

Taulukko 13. *Päto- ja loistehohäviöt huomioiden määritellyn ilmajohtoverkkomallin ja kaape-loidun verkkomallin simulointitilanteita vastaavat arvot ajanhetkellä 1,8 s sekä tu-lokset.*

#	P_{gen} [kW]	Q_{gen} [kVAr]	P_{load} [kW]	Q_{load} [kVAr]	P_{J01} [kW]	Q_{J01} [kVAr]	Stabiili saareke
32	4,75	-1,56	4,75	1,36	0,09	0,01	kyllä
33	18,98	-6,25	18,98	-3,32	0,18	0,08	kyllä
34	188,52	-62,45	185,60	-63,05	0,01	-0,07	ei
35	914,96	-312,25	867,30	-228,25	-0,16	0,02	ei
36	4,75	-1,56	4,75	85,79	0,50	-0,08	kyllä
37	18,98	-6,25	18,98	81,11	1,20	0,83	kyllä
38	188,52	-62,45	186,04	21,06	0,26	-0,69	kyllä
39	914,98	-312,25	869,92	-319,62	-0,58	0,14	ei

Taulukon 13 tuloksista voidaan havaita, että stabiilin saarekkeen muodostuminen päto- ja loistehohäviöiden osalta tarkasti tasapainotetussa verkkomallissa näyttäisi olevan mahdollista, mikäli verkkoon liitetyn tuotannon kokonaisteho on enintään 200 kVA. Simulointitilanteissa 34, 35 ja 39 invertterin yhteyteen toteutettu suojaus kytkee invertterin irti verkosta. Huomionarvoista on myös, että kevyesti kuormitetun maakaapeliverkon tapauksessa simulointitilanteissa 36, 37, 38 katkaisijan J01 mittaamissa päto- ja loistehossa on havaittavissa värähtelyä, jota ei esiinny vastaavissa ilmajohtoverkon simulointitilanteissa. Esiintyvän värähtelyn seurauksena tehotasapainon asettelu on epätarkempaa kuin vastaavissa ilmajohtoverkon simulointitilanteissa.

Simulointitilanteita vastaavan tilanteen toteutuminen todellisessa jakeluverkossa vaatisi käytännössä täsmälleen oikein asetellun hajautetun loistehon kompensoinnin sijaitsemista tarkasteltavalla verkkoalueella. Tehotasapainotilanne on erittäin epätodennäköinen, koska jakeluverkkoon sijoitettu hajautettu kompensointi on yleensä kiinteästi aseteltu, eikä sitä ole sijoitettu läheskään jokaiseen muuntopiiriin. Päto- ja loistehotasapainon muodostuminen on todennäköisempää, koska verkkoon liittyneiden asiakkaiden kuormat voivat teoriassa vastata verkkoon liitetyn hajautetun pientuotannon tasoa.

6. TULOSTEN ARVIOINTI JA JATKOTUTKIMUS-TARPEET

Simulointitulosten perusteella voidaan todeta, että stabiilin saarekkeen muodostuminen käytetyissä verkkomalleissa on rajoituksin mahdollista, mikäli johto-osat on mallinnettu vastaamaan jakeluverkossa käytettyjä keskijänniteverkon jodintyyppejä. Tehohäviöt, sekä mallinnettujen johto-osien tuottama loisteho sekä keskijänniteverkkoa syöttävän katkaisijan aukeamisen aiheuttama transientti voidaan olettaa syiksi saarekkeen muodostumisen epäonnistumiselle niissä tilanteissa, joissa saarekkeen muodostuminen ei ollut mahdollista. Ideaalisesti mallinnetussa keskijänniteverkossa stabiilin saarekkeen muodostuminen on mahdollista simulointitulosten mukaisin rajoituksin. Diplomityössä tarkasteltiin simuloimalla vain muutamia yksinkertaistettuja tilanteita, joissa ei-toivotun saarekkeen muodostumista voidaan pitää tehotasapainon kannalta todennäköisenä. Simulointitulosten luotettavuutta arvioitaessa tulee huomioida, että simulointiympäristön komponentit ovat vain malleja sähköverkon komponenteista. Työhön sisältyvissä simuloinneissa on tarkasteltu vain hyvin pientä osaa kaikista mahdollisista tehonsiirtotilanteista, joita jakeluverkossa voi esiintyä.

Simuloinneissa käytetyn invertterimallin käyttäytymisen vastaavuudesta jakeluverkon rinnalle kytkettyihin invertteriteknologiaan perustuviin todellisiin pientuotantokohteisiin verrattuna tulisi varmistua verifioimalla simulointitulokset kenttäkokein sekä mahdollisesti laitevalmistajien käyttämiä todellisia tuotteita mallintavia simulointimalleja käyttäen. Saarekkeen muodostuminen käytetyllä invertterimallilla näyttää olevan epätodennäköisempää sen nimellistehon kasvaessa, vaikka simuloitavan verkon topologia säilyi yhtenevänä kuormituksen säätämistä lukuunottamatta. Invertterimallin käyttäytymisen voidaan todennäköisesti olettaa poikkeavan todellisista verkon rinnalla käyvistä invertteleistä. Luvussa 5.4 esitettyjen simulointitulosten luotettavuutta tulisi tarkastella lisätutkimuksessa, koska saarekkeen muodostuminen ei vaikuta olevan täysin säännönmukaista. Käytetyn invertterimallin transientinaikainen toiminta ei ole välttämättä todenmukaista, vaikka invertterin todetaan sen datalehdessä olevan soveltuva transienttitilanteiden simulointiin. Lisäksi käytettyyn invertterimalliin lisätyt suojaustoiminnallisuudet on toteutettu yksinkertaistetusti ilman erillistä LOM-suojauksia. Diplomityön liitteeksi on lisätty simulointimallin mittauksista piirretyt kuvaajat, joista voidaan tarkastella invertterin suojauksen havaitsemia jännitteen ja taajuuden arvoja aikatasossa.

Tarkemmin asetellun tehotasapainotilanteen saavuttamiseksi simulointimallia tulisi kehittää siten, että verkkoon liitettävän kuormakomponentin teho säätyisi reaaliaikaisesti vastaamaan verkkoon voimalaitoksen ja keskijänniteverkkoa syöttävän katkaisijan suunnasta syötettyä summatehoa pätö- ja loistehon osalta. Diplomityötä varten muodostetussa

simulointiympäristössä käytetyn kuormakomponentin ominaisuudet eivät mahdollista-
neet kuorman säätämistä simulointiajon aikana. Luvussa 5.4 esitettyjen simulointitulost-
ten perusteella stabiilin saarekkeen muodostuminen näyttäisi olevan etenkin pienillä tuo-
tantotehoilla mahdollista, kun kuormituksen pätö- ja loistehon arvot on iteratiivista me-
netelmää käyttäen aseteltu vastaamaan hajautetun pientuotannon verkkomalliin syöttä-
mää tehoa sekä verkossa tapahtuvia pätö- ja loistehohäviöitä.

Todellisessa jakeluverkossa stabiilin saarekkeen muodostumisen voi simulointituloksia
tarkastelemalla todeta olevan erittäin epätodennäköistä. Jakeluverkon topologia on simu-
loinneissa käytettyjä verkkomalleja huomattavasti monimutkaisempi ja simulointimallien
kaltaiseen verkkoon voidaan olettaa vuorokaudenajasta ja vuodenajasta riippuen olevan
kytkettynä verkkoon liitettyyn mediaanitehoiseen pientuotantokohteeseen verrattuna
enemmän kuormitusta. Tämän seurauksena tehotasapainon muodostuminen laajuudel-
taan simulointiympäristöä vastaavassa keskijänniteverkon osassa vaatisi verkkoon liitet-
tyjen tuotantokohteiden määrän ja yksikkötehon merkittävää kasvua. Poikkeuksena edel-
liseen voidaan toki pitää usean pienitehoisen tai muutamien suuritehoisten, useaa kevyesti
kuormitettua muuntopiiriä syöttämään kykenevien voimalaitosten aiheuttamaa riskiä. Tu-
lostien perusteella yleisesti maakaapeloidussa keskijänniteverkossa käytetty keskitetty
loistehon kompensointi pienentää ei-toivotun saarekkeen syntymahdollisuuksia. Verk-
koon liitetty hajautettu kompensointi on usein kiinteästi aseteltua, mutta mahdollistaa teo-
riassa ei-toivotun saarekkeen synnyn oikeassa tehotasapainotilanteessa. Hajautetun tuo-
tannon määrän jatkuva kasvu sekä yksittäisten laitteistojen nimellistehojen kasvu voivat
johtaa tilanteeseen, jossa tiettyyn verkon osaan liitetyn hajautetuksi pientuotannoksi lu-
okiteltavien voimalaitosten määrä ja yhteenlaskettu nimellisteho täyttää tai ylittää verkon
osan kulutustason. Toimintaympäristön muutos tulee huomioda käyttötoiminnassa alati
kasvavien riskien realisoitumisen estämiseksi.

Simulointitulosten perusteella arvioituna suurin riski ei-toivotun saarekkeen syntymiseen
kohdistuu tällä hetkellä voimakkaimmin pienjänniteverkon osaan, joka jää saarekkeeseen
suunnitellun kytkentätyön tai suojauksen toiminnan seurauksena. Käytännössä edellä ku-
vattujen tilanteiden voidaan katsoa ideaalisen verkkomallin simulointien perusteella ole-
van mahdollinen luvussa 5.1 esitettyjen tulosten perusteella. Pienjännitejohtolähdöllä voi
etenkin harvaan asutulla alueella olla vain muutamia käyttöpaikkoja, joiden kulutusta joh-
tolähdölle liitetty pientuotanto vastaa. Luvussa 5.4 esitettyjen tulosten perusteella ei-toi-
votun saarekkeen syntymisen voidaan todeta olevan mahdollista myös pienessä, kevyesti
kuormitetussa keskijänniteverkon osassa etenkin ilmajohtoverkon tapauksessa hajautetun
pientuotannon täyttäessä tai ylittäessä kulutustason. Näitä tilanteita tulisi tarkastella edel-
leen kenttäkokein invertterien LOM-suojauksen toiminnan tutkimiseksi tehotasapainoti-
lanteissa.

Kytkeäsuunnittelun näkökulmasta verkkoon liitetyn hajautetun pientuotannon määrän
kasvaminen lisää kirjallisesti laadittavien kytkentäohjelmien monimutkaisuutta, koska

tuotantokohteet tulee standardin SFS 6002 (SFS 6002 2015) mukaisesti erottaa takasyöttövaaran vuoksi. Tuotantolaitteistojen omistajat tai niiden käytöstä vastaavat henkilöt tulee tuotantokohteen nimellistehosta riippuen kontaktoida erikseen etukäteen kytkentäohjelmalle sisällytettävistä toimenpiteistä sopimiseksi sekä esimerkiksi tarvittavien lisätietojen selvittämiseksi. KytKentäohjelmien monimutkaistuminen aiheuttaa lisätyötä niin käytönsuunnittelun, käyttökeskuksen sekä maastossa kytkentätöitä toteuttavien asentajien tasolla. Lisäksi jotkin työmenetelmät, kuten jännitetyöt voivat verkkoon liitetyn hajautetun pientuotannon aiheuttamien riskien vuoksi muuttua käyttökelvottomiksi. Lisätutkimustarpeena työn tuloksiin liittyen voidaan nimetä verkkoon liitettyjen hajautetuksi tuotannoksi luokiteltavien tuotantokohteiden vaikutus jännitetöiden toteutettavuuteen ja sähkötyöturvallisuuteen. Hajautetun tuotannon verkkoon, sähköasemalta nähdessä poikkeuksellisesta suunnasta, syöttämän tehon vaikutus jännitetöihin liittyviin kytkentäilmiöihin liittyen tulee selvittää toimenpiteitä vaativien tuotantolaitteistotyyppien tai erisuuruisien nimellistehojen aiheuttamien vaikutusten kartoittamiseksi.

Sähköautojen yleistyminen ja kaksisuuntaisten latauslaitteiden tulo markkinoille vaatii tulevaisuudessa toimenpiteitä, koska verkkoon päin syöttäviä latauslaitteita tulee käsitellä pientuotantokohteiden tavoin. Sähköautojen latauslaitteille ominaista on myös varsin suuri nimellisteho. Sähkön syötöstä sähköliittymän ulkopuoliseen jakeluverkkoon on aina sovittava jakeluverkkoyhtiön kanssa. (SESKO 2018) Myös muiden sähkövarastojen yleistyminen akkuteknologian kilpailukyvyyn parantuessa lisää todennäköisesti verkkoon liitettyjen tuotantolaitteistojen lukumäärää sekä voi kasvattaa yksittäisen tuotantokohteen verkkoon syöttämää tehoa.

Yhdeksi hajautetun pientuotannon aiheuttamaksi riskiksi voidaan tunnistaa verkkoon liitetty, puutteellisesti dokumentoidut tai dokumentoimattomat voimalaitokset, joiden laitteisto ei vastaa standardien asettamia vaatimuksia. Vaatimukset täyttämättömien tuotantolaitteistojen saatavuuden voidaan olettaa teknologian kehityksen myötä parantuneen esimerkiksi Euroopan ulkopuolelta tilattaessa. Verkon rinnalle kytketty, saarekkeen muodostamiseen kykenevä invertteri voi nimellistehostaan riippuen aiheuttaa merkittävän takasyöttövaaran. Myös mahdollisesti väärin tai puutteellisesti konfiguroidut tuotantolaitteiston suojausasettelut voivat aiheuttaa turvallisuusriskin, jos suojausten toiminta ei ole standardien mukaista. Takasyöttövaaran voivat muodostaa myös verkon rinnalle kytketyt varavoimakoneet, joiden eroonkytkentälogiikka ei toimi vaatimusten mukaisesti tai jotka on kytketty vastoin verkkoyhtiön vaatimuksia, kuten asianmukaista vaihtokytkintä. Yleisesti ottaen asiakkaiden tietämyksellä omistamiinsa laitteistoihin ja niihin kohdistuviin vaatimuksiin sekä käyttöön liittyen voidaan merkittävästi parantaa sähkö- ja sähkötyöturvallisuutta.

7. YHTEENVETO

Mikro- ja pientuotannolle voidaan löytää vaihtelevia määritelmiä käytetystä tietolähteestä riippuen. Hajautettu pientuotanto on tarkastelussa määritelty Energiategollisuuden verkko-yhtiöille kohdistamaan raportointikäytäntöön liittyen siten, että pientuotannoksi luetaan nimellisteholtaan enintään 1 MW suuruiset voimalaitokset. Mikrotuotannoksi on luokiteltu sellaiset voimalaitokset, joiden verkkoon syöttämän vaihevirran suuruus on enintään 16 ampeeria. Mikrotuotannon käsite on työhön liittyvien selvitysten yhteydessä osoittautunut tulevaisuudessa mahdollisesti käytöstä poistuvaksi siten, että pientuotannon käsite kattaisi myös aiemmin mikrotuotannoksi luokitellut voimalaitokset.

Työhön sisältyvää pientuotannon vaikutusten tarkastelu on selvitysten perusteella rajattu koskemaan tilanteita, joissa syöttävän verkon jännite häviää verkon osaa syöttävän kytkinlaitteen aukeamisen seurauksena. Tätä tilannetta voidaan soveltaa jakeluverkossa suoritettaviin suunniteltuihin töihin sekä yksinkertaistaen myös verkon vikatilanteisiin liittyen eri verkon osissa. Kyseisissä tilanteissa verkkoon liitetyt hajautetuksi tuotannoksi luokiteltavat voimalaitokset voivat tietyissä tilanteissa aiheuttaa takasyöttövaaran, mikäli ne jäävät ei-toivotusti syöttämään saareketta. Tässä diplomityössä tarkastelun ulkopuolelle on rajattu jakeluverkossa suoritettavat jännitetyöt ja niihin keskeisesti liittyvät verkon vajanapaiset kytkennät.

Työhön liittyvät simuloinnit on toteutettu hyödyntäen PSCAD 4.6.3 Professional -ohjelmistoa, joka on tarkoitettu graafisen käyttöliittymän avulla mallinnettavien piirien tarkasteluun. Ohjelmiston avulla voidaan tarkastella sähköverkossa tapahtuvia transienttitilanteita aikatasossa. Simuloinneissa käytetty verkkomalli koostuu sähköaseman katkaisijan kautta syötetystä jakeluverkosta sekä voimalaitosmallista, joka voidaan sijoittaa käyttäjän haluamien jakelumuuntajien pienjänniteverkon pisteisiin. Simuloinneissa mallinnettava, invertterin avulla jakeluverkkoon liitetty voimalaitos on kytketty nimellisjännitteeltään 0,4 kV:n pienjänniteverkkoon ja sen verkkoon syöttämää nimellistehoa voidaan säätää vapaasti. Simuloinneissa käytetty invertterin malli on kehitetty Vaasan yliopistossa osana SGEM-tutkimushanketta ja soveltuu rajoitetusti myös verkon vikatilanteiden simuloimiseen. Invertterin malliin on lisätty yksinkertaistettu, ideaalinen suojauslogiikka, joka erottaa voimalaitoksen verkosta voimassa erikseen aseteltavissa olevien suojauksen asettelu-arvojen mukaisesti.

Verkon rinnalla käyvät invertterit vaativat toimiakseen jännitteisen jakeluverkon, jonka standardien mukaista jännitettä ja taajuutta ne käyttävät toimintansa ohjaukseen. Invertterien suojaukset on toteutettu osaksi laitteiston ohjauspiiriä ja niiden tulee toimia, mikäli syöttävän verkon jännite ei vastaa aseteltuja toimintarajoja tai katoaa kokonaan. Tässä diplomityössä tarkastelun kohteeksi on rajattu juuri syöttävän verkon yhteyden katoamista mallintavat tilanteet eli niin kutsutut LOM-tilanteet. Invertteri voi jäädä syöttämään

ei-toivottua saareketta tilanteessa, jossa laitteiston tuottama sähköteho vastaa täsmälleen saarekkeessa kulutettua tehoa. Tilannetta on mallinnettu simulointiympäristössä siten, että jakelumuuntajan perään on lisätty pienjänniteverkon kulutusta mallintava säädettävä kuorma, joka voidaan asetella vastaamaan mallinnettavan voimalaitoksen tuottamaa ja verkkoon syöttämää tehoa.

Simuloinnit on suoritettu keskijännitteisen jakeluverkon osaa kuvaavassa piirissä, johon on liitetty kolme ideaalista jakelumuuntajaa kuvaavaa komponenttia. Jokaiseen jakelumuuntajan syöttämään muuntopiiriin on liitetty säädettävä kuorma ja mallilla voidaan tarkastella verkkoon liitetyn voimalaitosmallin käyttäytymistä tilanteessa, jossa tehontuotanto ja -kulutus ovat tasapainossa sähköaseman katkaisijaa tai muuta kytkinlaitetta kuvaavan komponentin tietyllä ajanhetkelle ajastetun aukeamisen jälkeen. Simuloinnit on suoritettu ensin täysin ideaaliseksi kuvatussa jakeluverkossa ei-toivotun saarekkeen muodostumisen mahdollisuuden osoittamiseksi. Tämän jälkeen keskijänniteverkon johto-osat on mallinnettu sekä osittain että kokonaan maakaapeloidun keskijänniteverkon mallia käyttäen. Viimeisessä vaiheessa kuormituksen arvot on aseteltu verkossa tapahtuvat pätö- ja loistehohäviöt huomioiden. Verkkoon liitetyn voimalaitoksen nimellistehoa on säädetty siten, että koko pientuotannon määritelmän mukainen nimellistehoalue on saatu tarkastelluksi riittävällä tarkkuudella.

Simulointien aikana ei-toivotun stabiilin saarekkeen syntyminen saatiin rajoituksin mallinnettua ideaalisin johto-osin mallinnetussa jakeluverkossa sekä jakeluverkossa, jonka keskijännitteiset johto-osat oli mallinnettu sähköisten ominaisuuksien osalta vastaamaan todellisessa jakeluverkossa käytettyjä johdintyyppejä. Tulosten perusteella voidaan todeta, että ei-toivotun saarekkeen syntyminen oli epätodennäköisempää, mikäli verkkoon liitetyn hajautetun pientuotannon nimellisteho oli aseteltu lähellä pientuotannolle määriteltäviä 1 MW ylärajaa. Simulointitulosten luotettavuutta tarkasteltaessa nousi esille huomio sekä selvitystarve simulointiympäristöön liitetyn invertterimallin simuloitun transientin aikaisen käyttäytymisen todenmukaisuudesta.

Työn tulosten valossa esille nousee kytkentäsuunnittelun kehittämisen sekä käyttötoiminnan turvallisuuden edistämisen näkökulmasta selkeä lisätutkimustarve jakeluverkkoon liitettyjen invertterien todellisesta käyttäytymisestä LOM-tilanteissa. Verkkoon liitettyjen pientuotantokohteiden määrän kasvun voidaan olettaa jatkuvan laitteistojen hankintakustannusten laskiessa ja tietoisuuden lisääntyessä. Lisäksi esimerkiksi sähköautojen kaksisuuntaisten latauslaitteistojen yleistymisen lisää verkkoon liitettyjen voimalaitoksiksi luokiteltavien kohteiden määrää. Simulointiympäristössä saadut tulokset tukevat valmistajien ja kirjallisuuden esittämää tietoa verkkoon liitettyjen invertterien toiminnasta LOM-tilanteissa, mutta havainnoille tulisi saada varmistus jatkotutkimuksessa. Diplomi-työssä suositetaan ei-toivotun saarekekäyttötilanteen syntymisen mahdollisuutta tarkastelevien kenttäkokeiden suorittamista todellisessa verkkomallissa ainakin pienjännitteisessä jakeluverkossa.

LÄHTEET

Caruna Oy. (2019). Urakoitsijaohjeet – Sähköntuotanto. [WWW]. Viitattu 2.5.2019. Saatavissa: <https://www.caruna.fi/urakoitsijat/urakoitsijaohjeet/sahkontuotanto>

Business Finland. (2019). Rahoitus – Energiatuki. [WWW]. Viitattu: 14.2.2019. Saatavissa: <https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/energiatuki>

Elenia Oy. (2018). Uutiset - Fortum ja Elenia rakentavat sähkön varastointia sähköjärjestelmän tasapainon ylläpitoon ja sähkökatkojen vähentämiseen. [WWW]. Viitattu 12.4.2019. Saatavissa: <https://www.elenia.fi/uutiset/fortum-ja-elenia-rakentavat-s%C3%A4hk%C3%B6n-varastointia-s%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelm%C3%A4n-tasapainon-yll%C3%A4pitoon-ja>

Elenia Oy. (2019a). Elenian sisäinen materiaali, ei julkaistu.

Elenia Oy. (2019b). Sähköverkon kunnossapito - Kysymyksiä ja vastauksia. [WWW]. Viitattu 1.3.2019. Saatavissa: http://www.elenia.fi/sahko/kunnossapito_ukk

Elovaara J. & Haarla L. (2011). Sähköverkot II: verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Tallinna, Otatieto. 550 s.

Energiateollisuus. (2019a). Sähköntuotanto energianlähteittäin. [WWW]. Viitattu 1.3.2019. Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto

Energiateollisuus. (2019b). Sähköntuotanto, vesivoima. [WWW]. Viitattu 10.4.2019. Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/vesivoima

Energiateollisuus. (2019c). Verkkopalveluehdot VPE2019. [WWW]. Viitattu 18.3.2019. Saatavissa: https://energia.fi/files/3726/Verkkopalveluehdot_VPE_2019.pdf

Energiateollisuus. (2016b). Mikrotuotannon liittäminen jakeluverkkoon. [WWW]. Viitattu 1.3.2019. Saatavissa: https://energia.fi/files/762/Mikrotuotannon_liittaminen_sahkonjakeluverkkoon_YA9_13_verkostosuositus_paivitetty_20160427.pdf

Energiateollisuus. (2016c). Sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon. [WWW]. Viitattu 14.2.2019. Saatavissa: https://energia.fi/files/1248/Ohje_tuotannon_liittamisesta_jakeluverkkoon_PAIVITETTY_20160427.pdf

Energiateollisuus. (2016d). Tekninen liite 1 ohjeeseen sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon – nimellistehoaltaan enintään 100 kVA laitoksen liittäminen. [WWW]. Viitattu 14.2.2019. Saatavissa: https://energia.fi/files/1249/tekninen_liite_1_-_enintaan_100_kVA_PAIVITETTY_20160427.pdf

Energiateollisuus. (2016e). Tekninen liite 2 ohjeeseen sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon – nimellistehoaltaan yli 100 kVA laitoksen liittäminen. [WWW]. Viitattu 14.2.2019. Saatavissa: https://energia.fi/files/1252/tekninen_liite_2_-_yli_100_kVA_paivitetty_20160427.pdf

Energiavirasto. (2019a). Voimalaitosrekisteri. [WWW]. Viitattu 4.10.2019. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12722768/Energiaviraston+voimalaitosrekisteri/467811b9-c41a-5118-15bc-d4a93713474e>

Energiavirasto. (2019b). Tuotantotuki. [WWW]. Viitattu 4.10.2019. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/tuotantotuki>

Energiavirasto. (2019c). Preemiojärjestelmä. [WWW]. Viitattu 4.10.2019. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/preemiojarjestelma>

Energiavirasto. (2018). STT - Lehdistötiedote 18.6.2018: Sähkönpuhtaus tuotanto kovassa kasvussa - Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti 2,5 -kertaistui vuodessa. [WWW] Viitattu 14.2.2019. Saatavissa: <https://www.sttinfo.fi/tiedote?publisherId=2054&releaseId=68637996>

Euroopan unioni. (2019). 2030 Energy Strategy. [WWW]. Viitattu 14.2.2019. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2030-energy-strategy>

Fingrid Oyj. (2018). Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2018. [WWW]. Viitattu 09.03.2019. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarman-sahkon-siirto/vjv2018.pdf>

Fingrid Oyj. (2019). Kantaverkon ja asiakasliityntöjen relesuojaus. [WWW]. Viitattu 16.5.2019. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/kantaverkon-ja-asiakasliityntöjen-relesuojausohje-20190506.pdf>

Kauhaniemi K., Ristolainen I., Saari P., Lågland H., Salminen H., Hokkanen M. & Brännbacka B. (2005). Simulointiympäristö loppuraportti. Vaasan yliopisto. 129 s.

Kauhaniemi K. & Voima S. (2012). Adaptive Relay Protection Concept for Smart Grids. Renewable Efficient Energy II Conference. Vaasa.

Kauhaniemi K. (2012). Simple Grid Inverter Model, Version 1, Documentation. SGEM PSCAD Model Library.

Kamppari T. (2019). Käytönsuunnittelun asiantuntija, Elenia Oy. Haastattelu 18.4.2019.

Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta 30.12.2010/1396. (2010). [WWW]. Viitattu 14.2.2019. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2010/20101396>

Lakervi E. & Partanen J. (2008). Sähkönjakelutekniikka. 2. painos. Helsinki, Otatieto Helsinki University Press. 295 s

Lehto I. (2009). Mikrotuotannon liittäminen yleiseen sähkönjakeluverkkoon. Diplomityö. Espoo. Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos. 101 s.

Minkkinen R. (2019). Yhteyspäällikkö, asiakkuudet, Elenia Oy. Haastattelu 2.5.2019.

Motiva. (2017). Aurinkosähkö - Aurinkosähköjärjestelmien hinta. [WWW]. Viitattu 14.2.2019. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/aurinkosahkojarjestelmien_hinta

Mäki K. (2007). Novel Methods for Assessing the Protection Impacts of Distributed Generation in Distribution Network Planning. Tampere University of Technology. 69 s.

PSCAD. (2019). PSCAD User's Guide v4.6. [WWW]. Viitattu 16.5.2019. Saatavissa: <https://hvdc.ca/knowledge-base/read,article/160/pscad-user-s-guide-v4-6/v>:

Pienvesivoimayhdistys. (2014). Pienvesivoimalaopas. [WWW]. Viitattu 14.2.2019. Saatavissa: <http://pienvesivoimayhdistys.com/wp-content/uploads/2014/05/Pienvesivoimaopas.pdf>

Raipala O., Mäkinen A., Repo S. & Järventausta P. (2016). An Anti-Islanding Protection Method Based on Reactive Power Injection and ROCOF. IEEE Transactions on Power Delivery. 32. 1-1.

Raipala O. (2018). Novel Methods for Loss of Mains Protection. Tampere University of Technology. 169 s.

Repo S., Laaksonen H., Mäki Kari., Mäkinen Antti. & Järventausta P. (2005). Hajautetun sähköntuotannon vaikutukset keskijänniteverkossa. Sähkövoimatekniikan tutkimusraportti 2005:3. Tampereen teknillinen yliopisto. 169 s.

Ruokavirasto. (2019). Yritystuet – Maaseudun yritystuet. [WWW]. Viitattu 16.2.2019. Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/Yritystuet/maaseudun-yritystuet/>

SESKO. (2018). Sähköajoneuvojen lataussuositus. [WWW]. Viitattu 10.6.2019. Saatavissa: https://www.sesko.fi/files/1098/Lataussuositus_2019_2019-05-27.pdf

SFS-EN 50438. (2015). Tekniset vaatimukset yleisen pienjännitejakeluverkon kanssa rinnan toimiville mikrogeneraattoreille. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki. 139 s.

SFS-EN 50549-1. (2019). Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks - Part 1: Connection to a LV distribution network - Generating plants up to and including Type B. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki. 73 s.

SFS 6002. (2015). Sähkötyöturvallisuus. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki. 69 s.

Suomen tuulivoimayhdistys. (2019). Tuulivoima Suomessa. [WWW]. Viitattu: 14.2.2019. Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-suomessa>

Suomen Ympäristökeskus. (2015). Hajautettu energiantuotanto Suomessa – Nykytila ja tulevaisuus sekä vaikutukset ilmanlaatuun. [WWW]. Viitattu 13.3.2019. Saatavissa: <http://www.syke.fi/download/noname/%7BDD119785-B537-45DE-AEF0-8360DCAB1BDF%7D/111845>

Sähkömarkkinalaki 588/2013. (2013). [WWW]. Viitattu 13.3.2019. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588>

Sähköturvallisuuslaki 1135/2016. (2016). [WWW]. Viitattu 13.3.2019. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161135>

Teodorescu R., Liserre M. & Rodrigues P. (2010). Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. John Wiley & Sons, Ltd. 398 s.

Verohallinto. (2019). Kotitalousvähennys. [WWW]. Viitattu 14.2.2019. Saatavissa: <https://www.vero.fi/henkiloasiakkaat/verokortti-ja-veroilmoitus/tulot-ja-vahennykset/kotitalousvahennys>

Työ- ja elinkeinoministeriö. (2018). Älyverkkotyöryhmän loppuraportti 24.10.2018. [WWW]. Viitattu 16.3.2019. Saatavissa: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161148/TEM_33_2018.pdf

Yleisradio. (2018). Olet oikeassa, sähkön siirtohinta on noussut rajusti – tutki MOT:n hakukoneesta alueiden erot. [WWW]. Viitattu 4.10.2019. Saatavissa: <https://yle.fi/aihe/artikkeli/2018/12/17/olet-oikeassa-sahkon-siirtohinta-on-noussut-rajusti-tutki-motn-hakukoneesta>

LIITE A: TUOTANNON YLEISTIETOLOMAKE

Energiateollisuus ry:n suosittelema yleistietolomake

PIENTUOTANTOLAITTEISTON JA/TAI SÄHKÖVARASTON LIITTÄMINEN SÄHKÖVERKKOON

Tällä lomakkeella asiakas ilmoittaa verkkoyhtiölle tiedot nimellistehoaltaan enintään 100 kVA tuotantolaitteiston ja/tai sähkövaraston sähköverkkoon liittämistä varten. Lomakkeen voi antaa täytettäväksi laitteiston toimittajalle ja/tai laitteiston kytkevälle sähköurakoitsijalle. Verkkoyhtiöllä on oikeus varmistaa, että tuotantolaitteisto täyttää liittämistä koskevat tekniset edellytykset.

1. YHTEYSTIEDOT

Tuotantolaitoksen omistaja	Henkilötunnus tai Y-tunnus	
Sähköposti	Puhelinnumero	
Osoite	Postinumero	Postitoimipaikka
Liittymän osoite (tuotantolaitoksen sijaintipaikka)	Postinumero	Postitoimipaikka
Käyttöpaikan numero (löytyy sähkösiirtolaskulta)		
Yhteyshenkilö (jos muu kuin tuotantolaitoksen omistaja)	Sähköposti	
	Puhelinnumero	

2. TUOTANTOLAITTEISTON PERUSTIEDOT

Tuotantomuoto	<input type="checkbox"/> Aurinko	<input type="checkbox"/> Tuuli	<input type="checkbox"/> Biokaasu	<input type="checkbox"/> Diesel	<input type="checkbox"/> Vesi	<input type="checkbox"/> Muu, mikä?
Verkkoonliittämlaitteiden (invertteri/vaihtosuuntaaja) valmistaja, määrä ja malli						
Tuotantolaitteiston nimellisteho (suurin mahdollinen laitteistosta sähköverkkoon siirtyvä teho)	kVA/kW	Tuotantolaitteiston enimmäisvikavirta (laitoksen suurin mahdollinen virta)	A			
		Liittymän mitattu oikosulkuvirta (pääkeskus tms.)	A			
Laitteiston kytkentä	<input type="checkbox"/> Kolmivaiheinen	<input type="checkbox"/> Yksivaiheinen, merkitse vaihe	<input type="checkbox"/> L1 <input type="checkbox"/> L2 <input type="checkbox"/> L3			
<input type="checkbox"/> Käyttöpaikkaan on liitetty sähkövarasto (akku)	Sähkövaraston kapasiteetti ja teho		kWh			
			kW			

3. TUOTANTOLAITTEISTON TEKNISET TIEDOT

3.1. Tuotantolaitteiston suojaus (valitse YKSI seuraavista vaihtoehdoista)

Tuotantolaitteisto täyttää seuraavan teknisen standardin tai suosituksen vaatimukset, mukaan lukien verkkoonliittämlaitteen (invertteri/vaihtosuuntaaja) suojausasettelut ja irtikytketymisajat

<input type="checkbox"/> Mikrotoisantostandardi SFS-EN 50438, Suomen asetukset (sama kuin Energiateollisuus ry:n suositus 2016, tekninen liite 1)	<input type="checkbox"/> Jokin muu
<input type="checkbox"/> Saksalainen vaatimusdokumentti VDE-AR-N 4105 2011-8 (suojaustekniset vaatimukset)	<input type="checkbox"/> HUOM! Jos valitset tämän vaihtoehdon, täytä myös lomakkeen kohta 8.
HUOM! VDE V 0126 1-1 ei ole hyväksyttävä	

3.2. Tuotantolaitteiston erottaminen

<input type="checkbox"/>	Vakuutan, että tuotantolaitteisto on erotettavissa erillisellä erotuskytkimellä, johon verkonhaltijalla on esteetön pääsy (esim. talon ulkoseinällä, ei lukitussa tilassa)
Erotuskytkimen sijainti (esim. talon ulkoseinällä pääoven vieressä)	
<input type="checkbox"/>	Liittymän sähkökeskuksilla on varoituskyttilä takasyöttövaarasta ja opastus laitteiston irtikytkemiselle

4. TUOTETUN SÄHKÖN VERKKOONSYÖTTÄMINEN

Verkkoyhtiön sähköverkkoon siirtyvän sähkön ostaja (yhtiön nimi)
<input type="checkbox"/> Sähkö siirto käyttöpaikalta sähköverkkoon on teknisesti estetty (sähkö ostajaa ei tarvita)

HUOM! Verkkoyhtiön sähköverkkoon syötettävälle sähkölle on oltava ostaja.

5. TUOTANTOLAITTEISTON ASENTAJAN/URAKOITSIJAN TIEDOT

(tuotantolaitteiston sähköverkkoon kytkevä urakoitsija täyttää)

Sähköurakoitsija	TUKES-numero	
Osoite	Postinumero	Postitoimipaikka
Yhteyshenkilö	Puhelinnumero	Sähköposti

Urakoitsija toimittaa asiakkaalle laitteistoa koskevan käyttöönottotarkastuspöytäkirjan. Käyttöönottotarkastuspöytäkirja on pyydettyä toimittava verkonhaltijalle.

6. LISÄTIEDOT

Lisätietoja

Verkkoyhtiöt voivat tämän lomakkeen lisäksi pyytää myös muita tarvitsemiaan tietoja tai lomakkeita laitteistosta ja sen liittämisestä. Lisätietoja saat verkkoyhtiöltäsi.

7. ALLEKIRJOITUS

Vakuutan antamani tiedot oikeiksi	
Päivämäärä ja paikka	Allekirjoitus ja nimenselvennys

Lomakkeen voi allekirjoittaa tuotantolaitoksen omistaja tai hänen valtuuttamansa taho, kuten sähköurakoitsija

8. Tuotantolaitteiston verkkoonliitännälaitteen suojausasettelut ja irtikytketymisajat

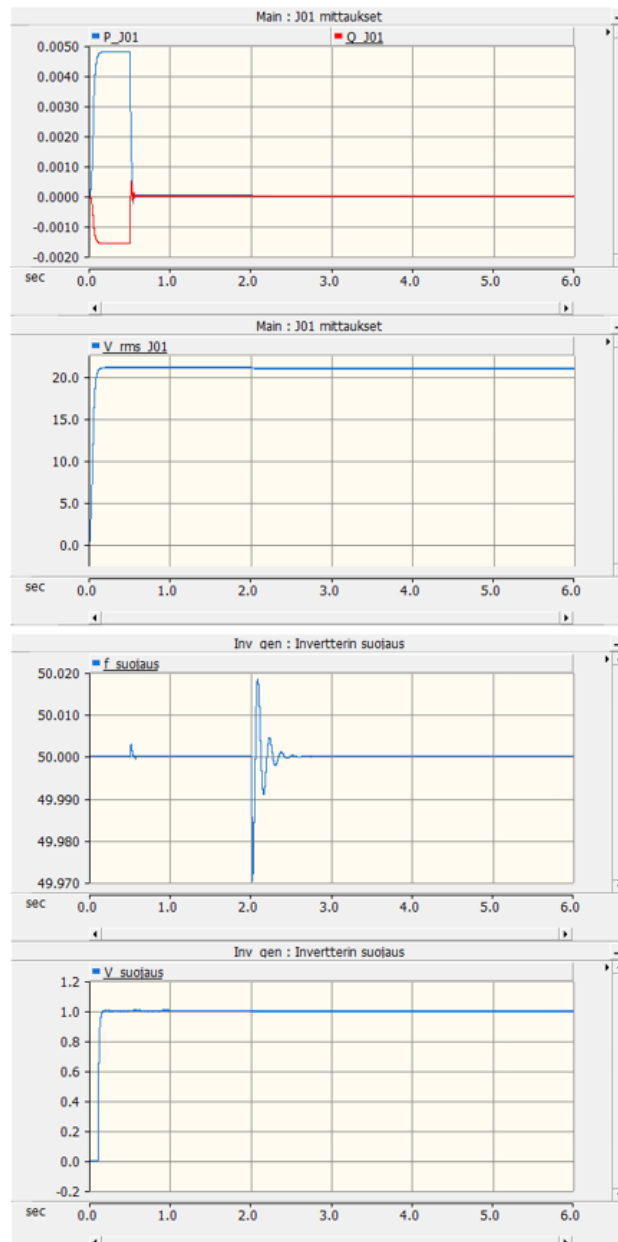
HUOM! Täytä tämä osa vain, jos valitsit kohdassa 3. vaihtoehdon Jokin muu

HUOM! Verkonhaltijalla on oikeus olla hyväksymättä verkkoonsa tuotantolaitteistoja, joiden suojausten soveltuvuutta verkkoon ei voida varmistaa.

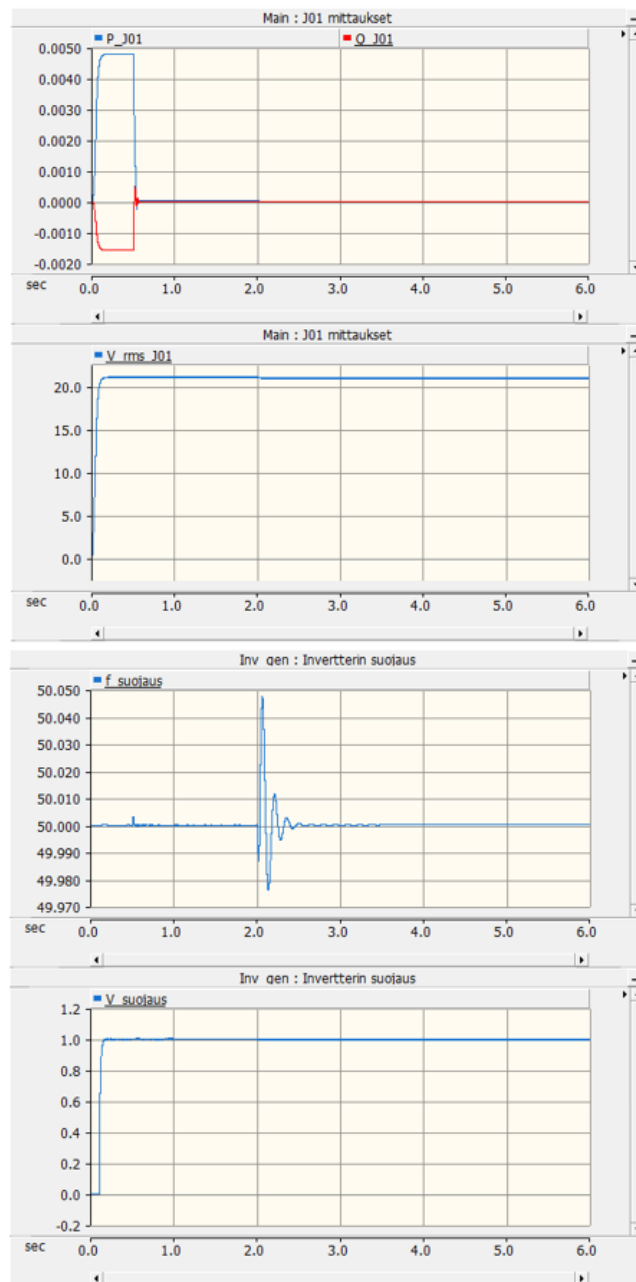
Verkkoonliitännälaitteen suojausasettelu noudattaa standardia:					
Parametri	Asettelu-arvo	Toiminta-aika	Parametri	Asettelu-arvo	Toiminta-aika
Ylijännitesuojaus 1			Ylitaajuussuojaus 1		
Ylijännitesuojaus 2*			Ylitaajuussuojaus 2*		
Alijännitesuojaus 1			Alitaajuussuojaus 1		
Alijännitesuojaus 2*			Alitaajuussuojaus 2*		
* jos on					
Tuotantolaitteiston automaattinen tahdistumisaika verkkojännitteen palaututtua					s
Saarekekäytönestosuojauksen (Loss of Mains) toteutustapa ja toiminta-aika					
<input type="checkbox"/> Tuotantolaitteisto on CE-merkitty					

LIITE B: SIMULOINTITULOKSET, IDEAALINEN VERKKOMALLI

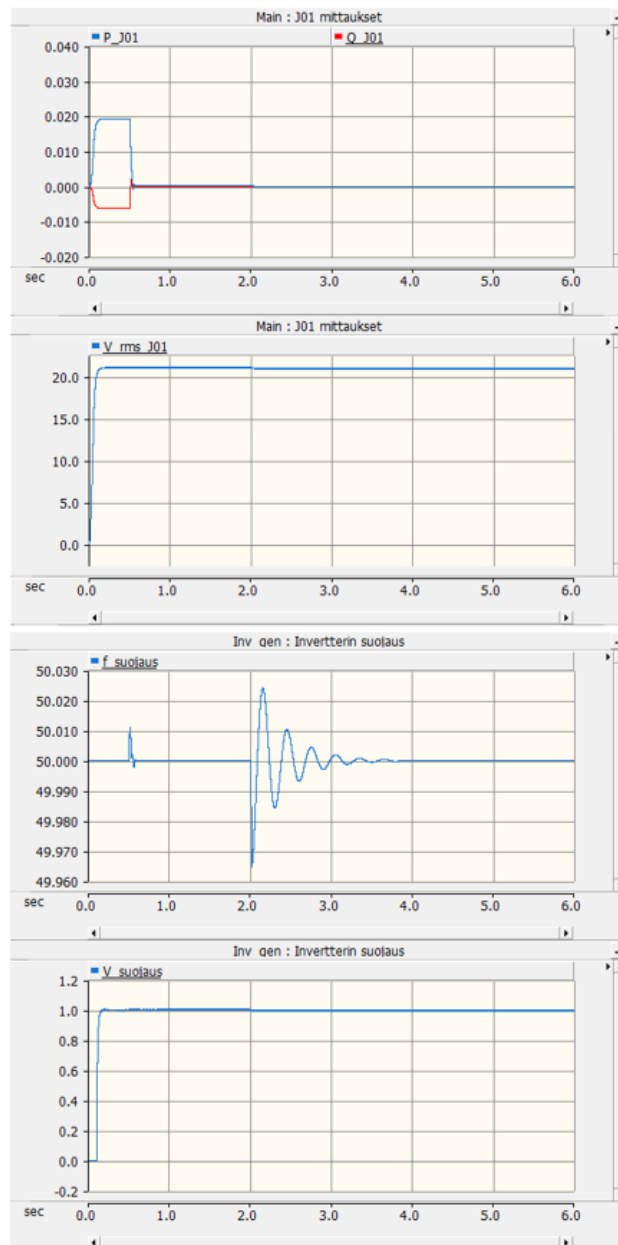
Ideaalisen verkon simulointitilanne 1

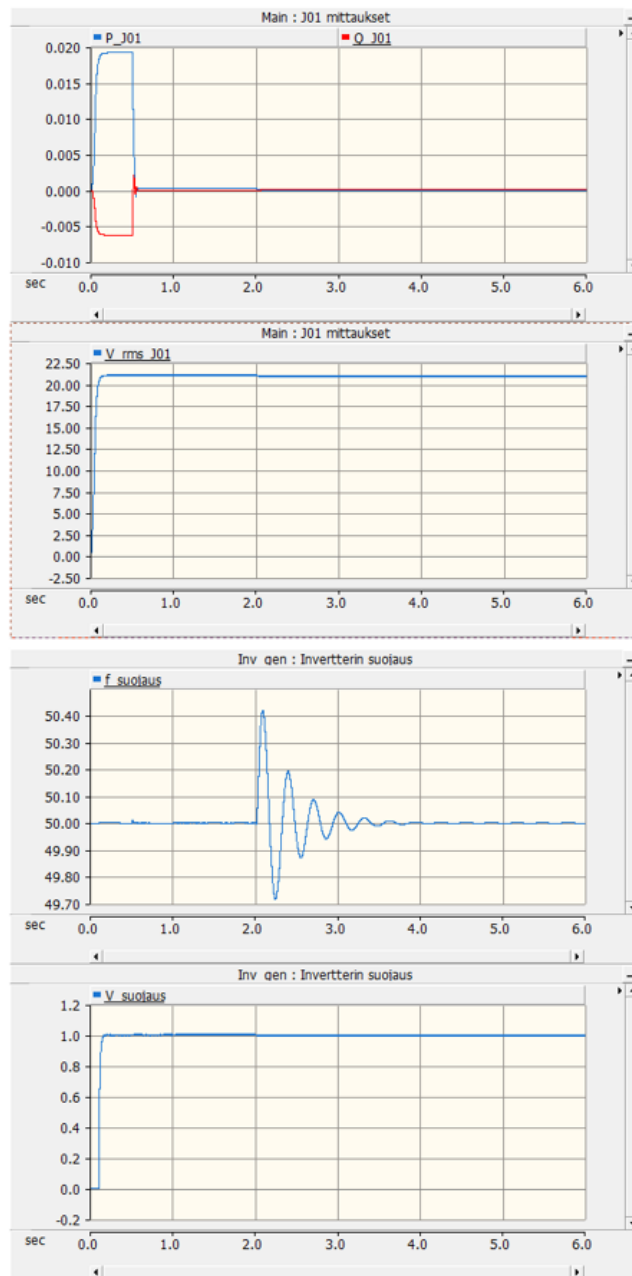


Ideaalisen verkkomallin simulointitilanne 2

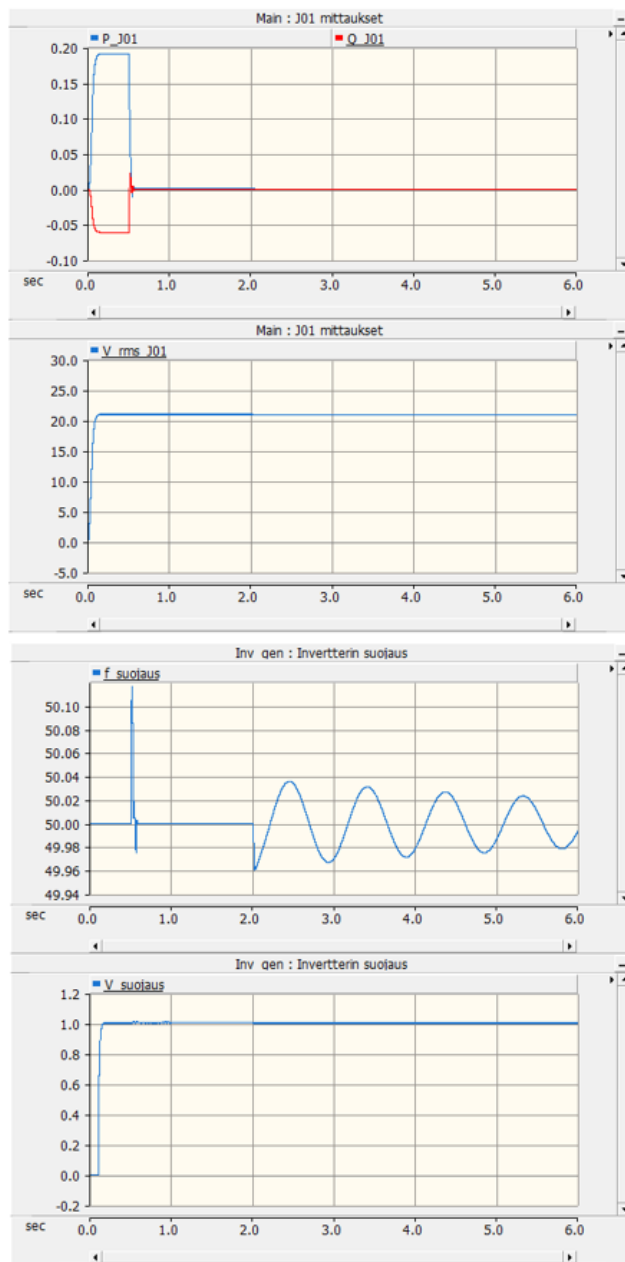


Ideaalisen verkkomallin simulointitilanne 3

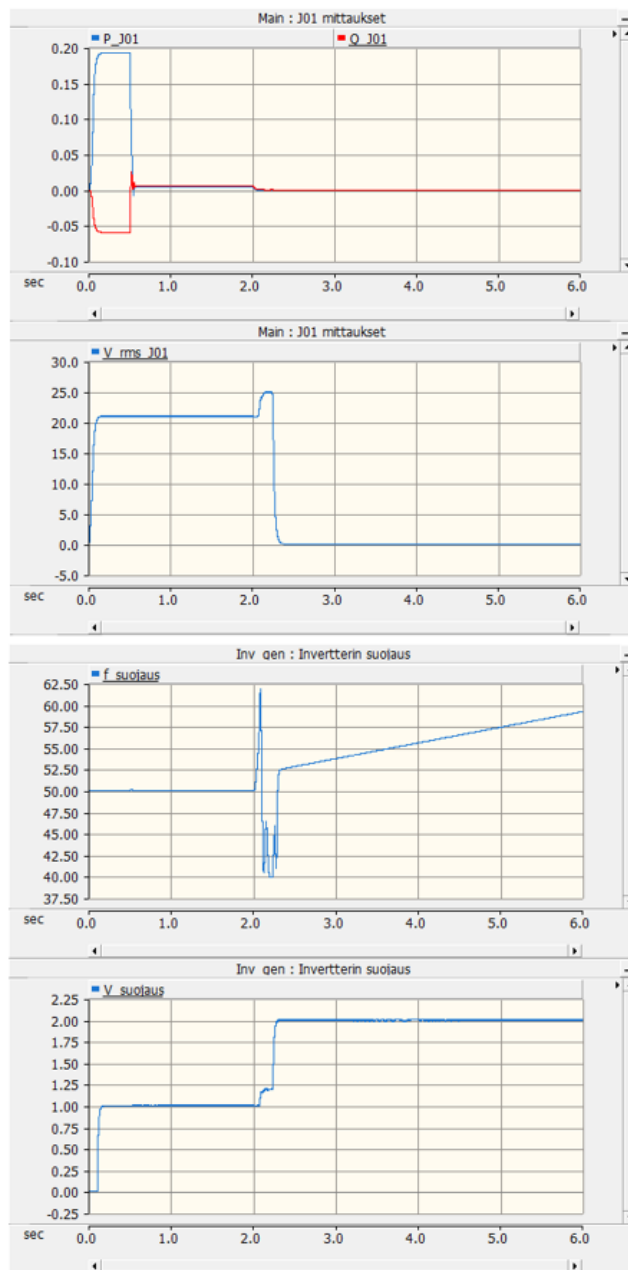


Ideaalisen verkkomallin simulointitilanne 4

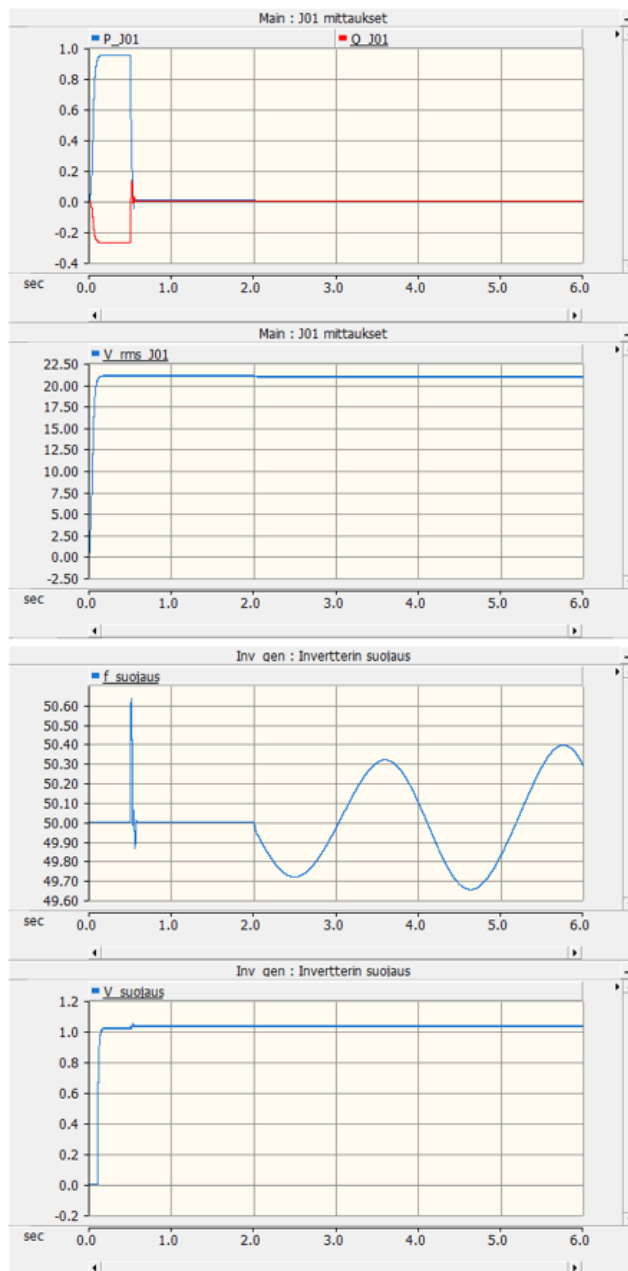
Ideaalisen verkkomallin simulointitilanne 5



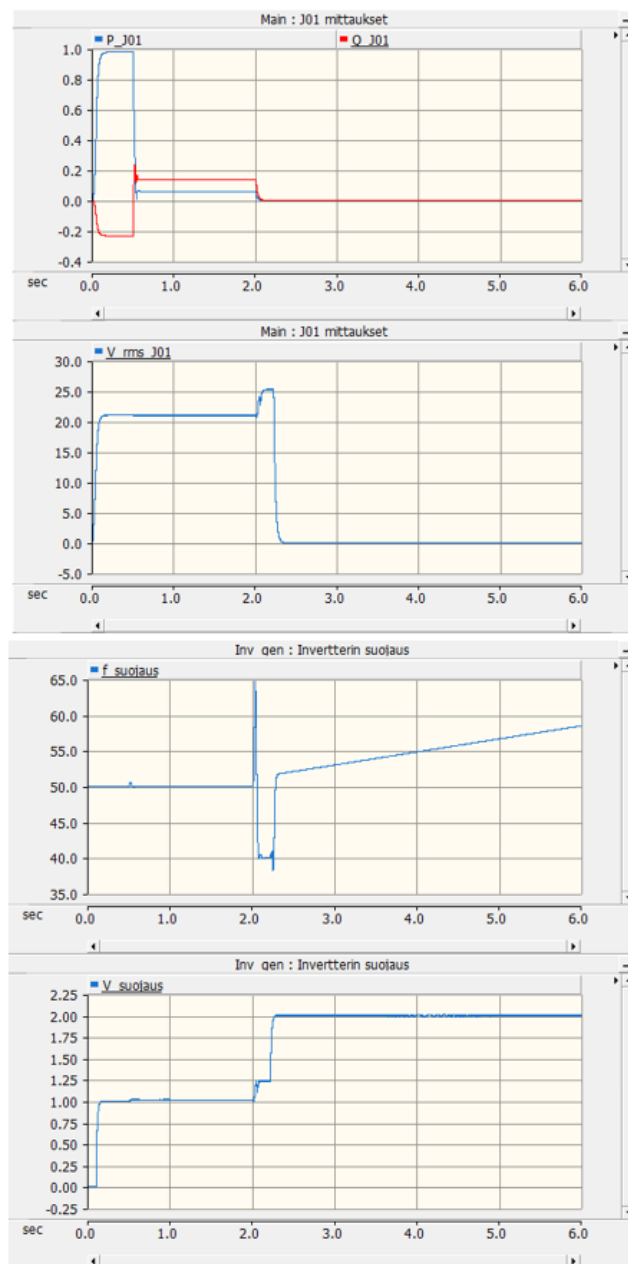
Ideaalisen verkkomallin simulointitilanne 6



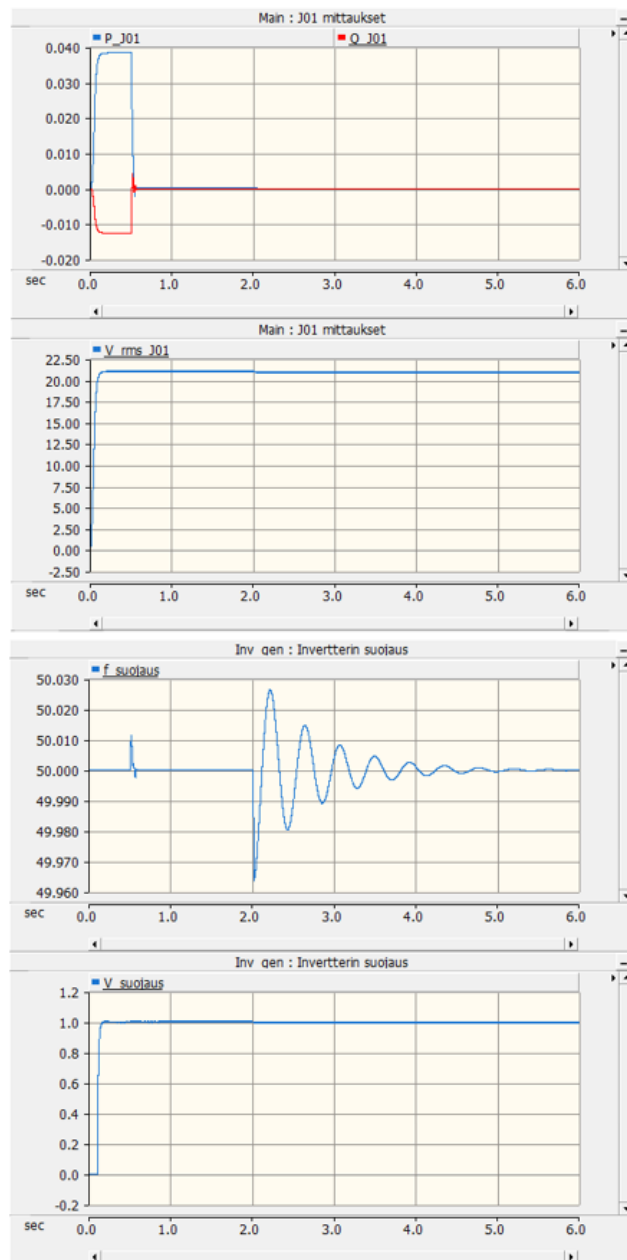
Ideaalisen verkkomallin simulointitilanne 7



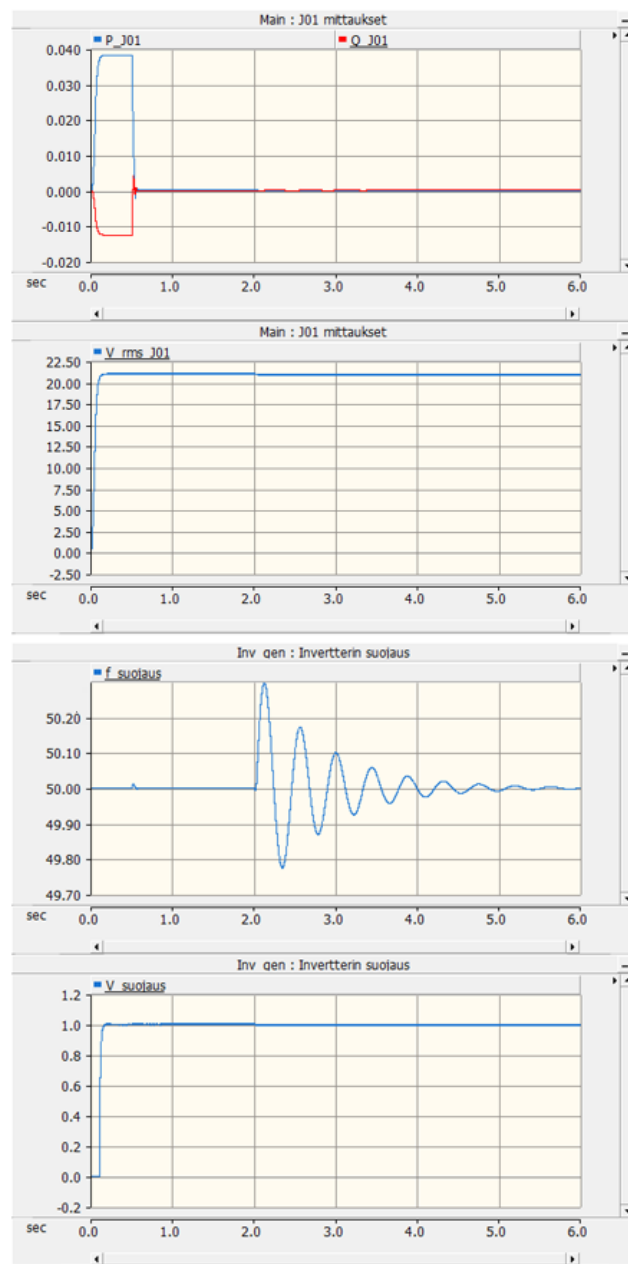
Ideaalisen verkkomalin simulointitilanne 8



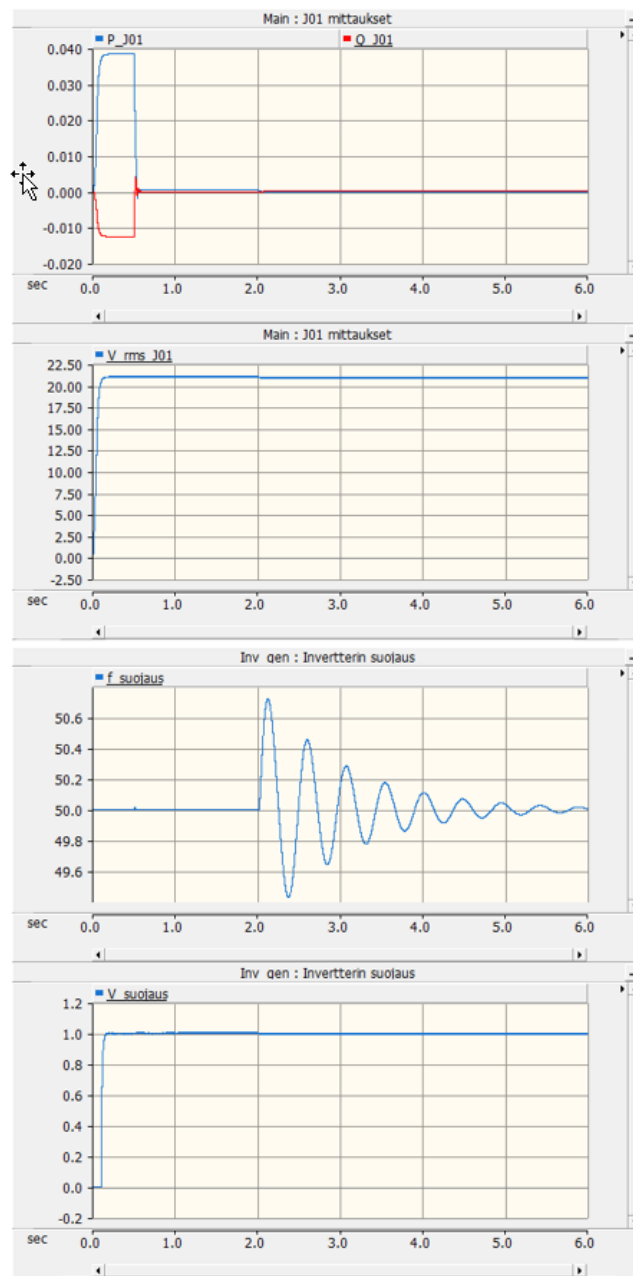
Ideaalisen verkkomallin simulointitilanne 9



Ideaalisen verkkomallin simulointitilanne 10

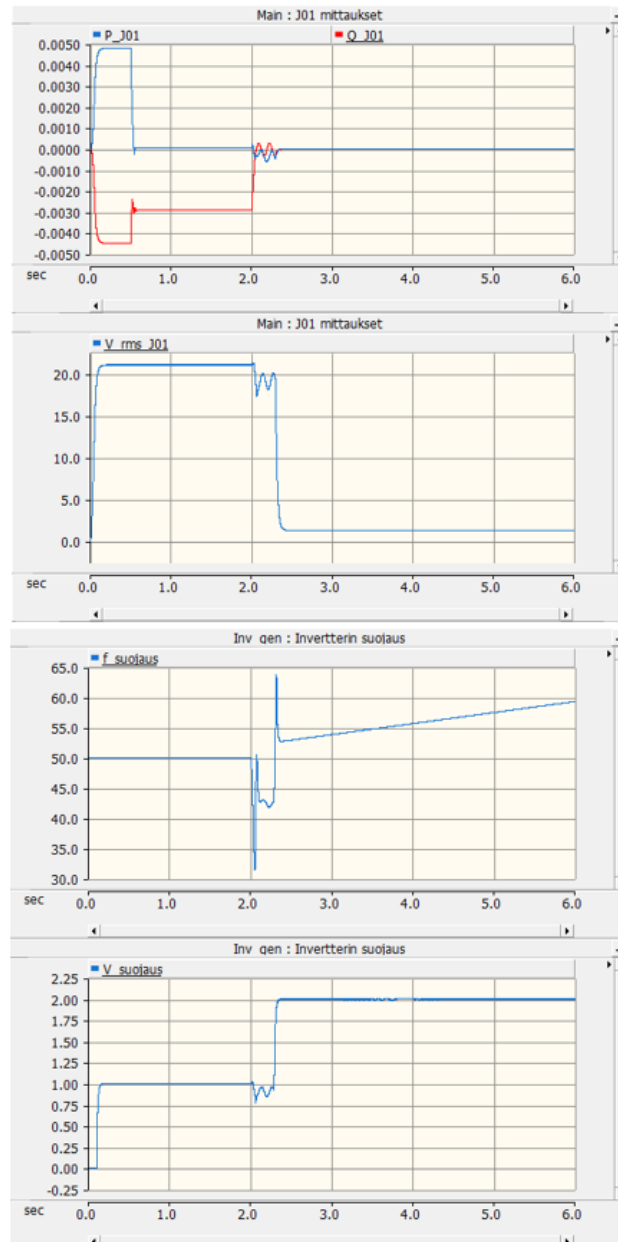


Ideaalisen verkkomallin simulointitilanne 11

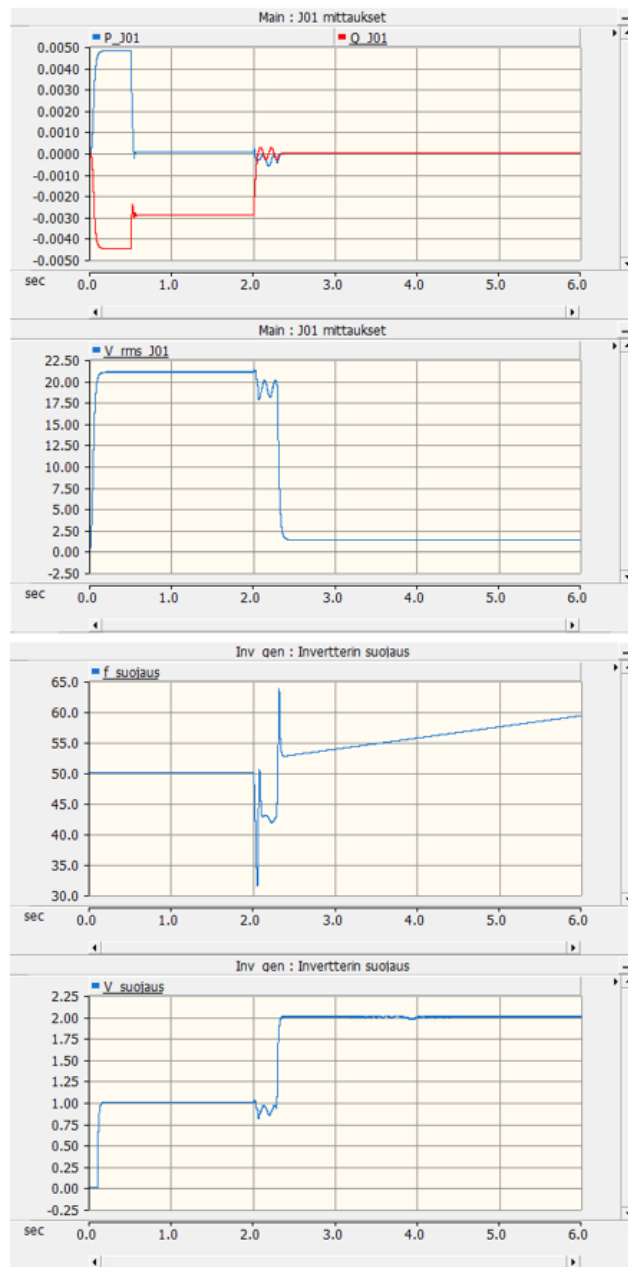


LIITE C: SIMULOINTITULOKSET, ILMAJOHTO- VERKKOMALLI HÄVIÖT HUOMIOIMATTA

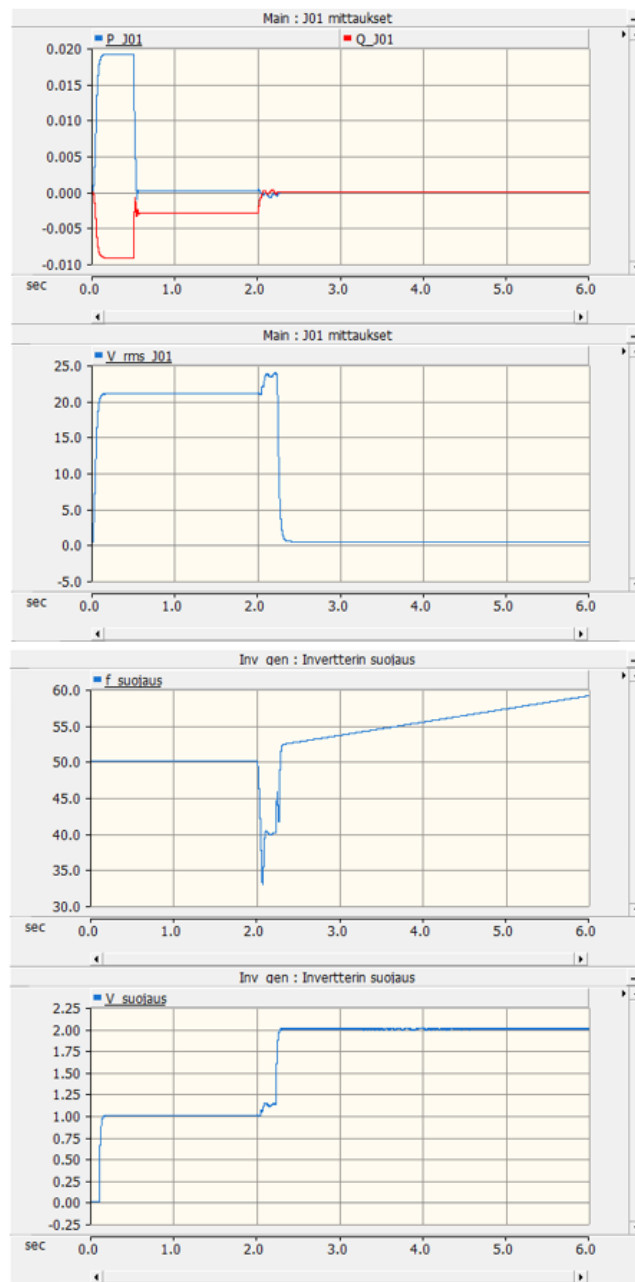
Ilmajohtoverkon simulointitilanne 12



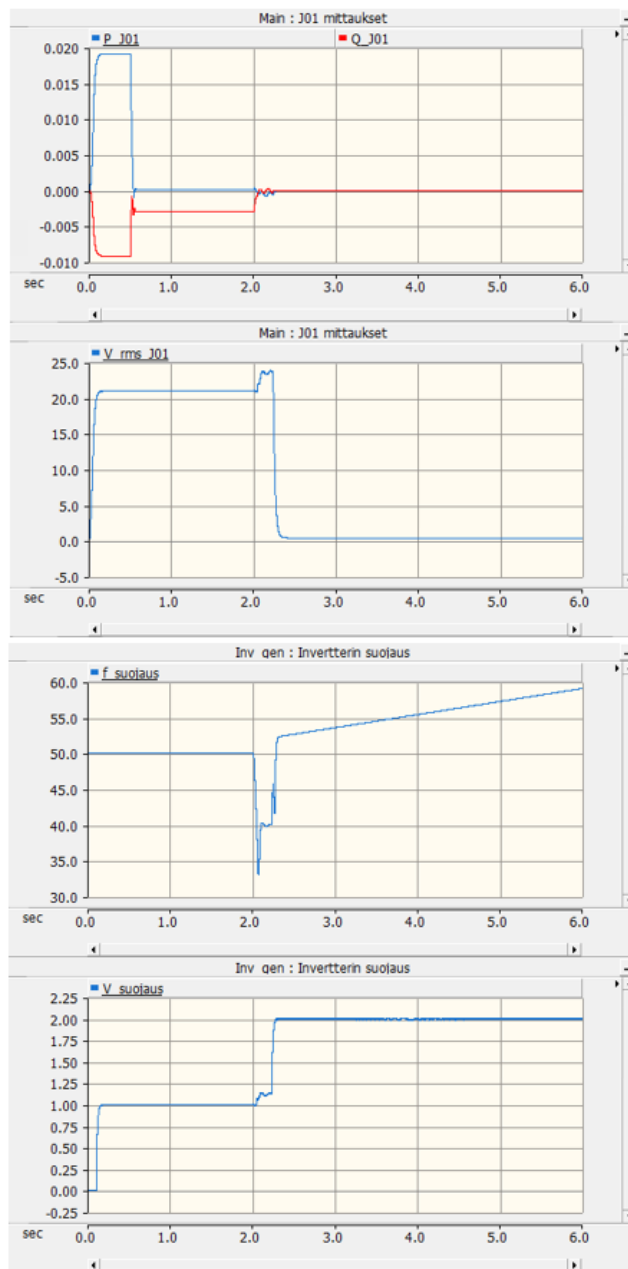
Ilmajohtoverkon simulointitilanne 13



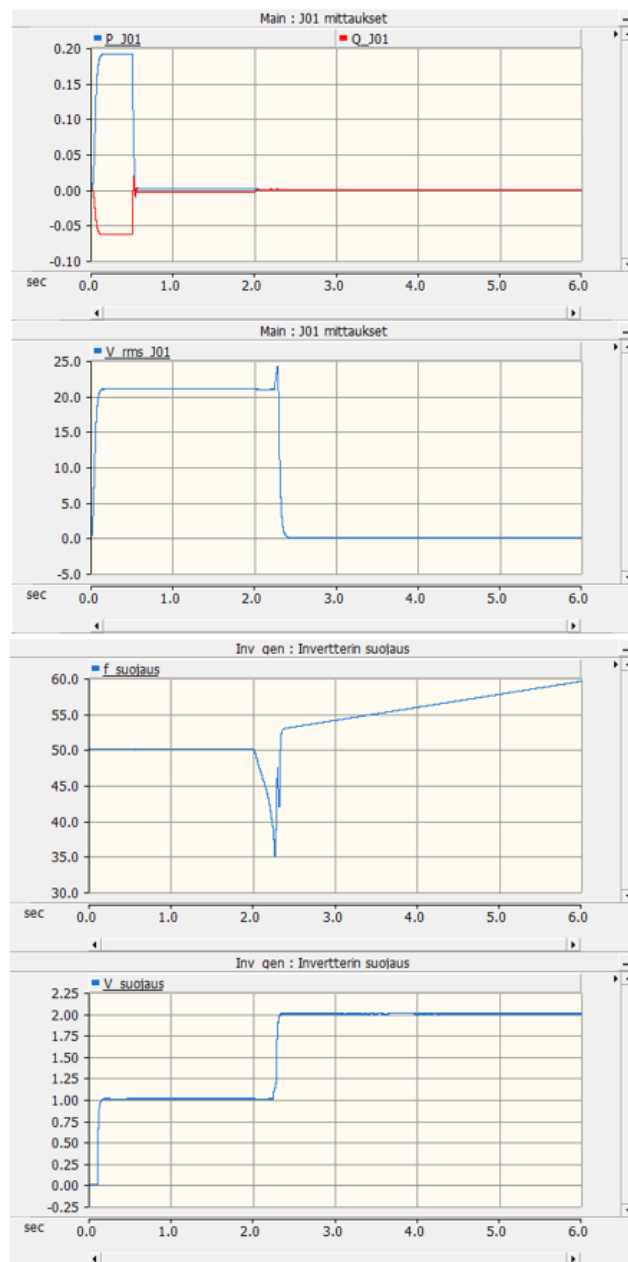
Ilmajohtoverkon simulointitilanne 14



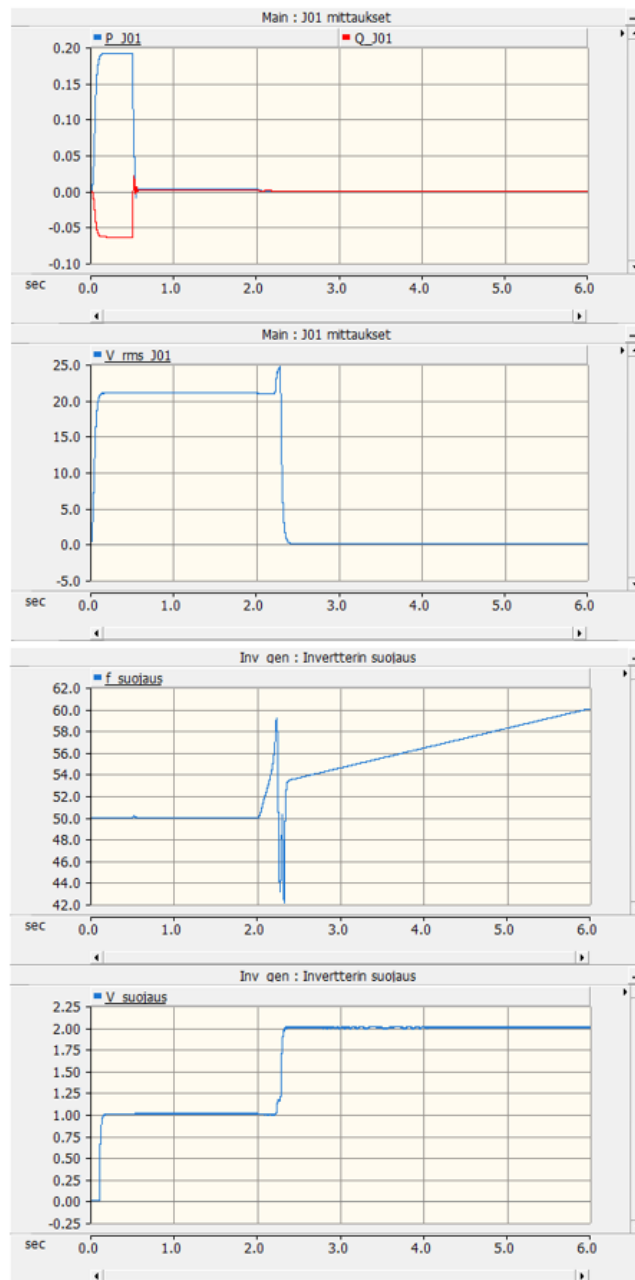
Ilmajohtoverkon simulointitilanne 15



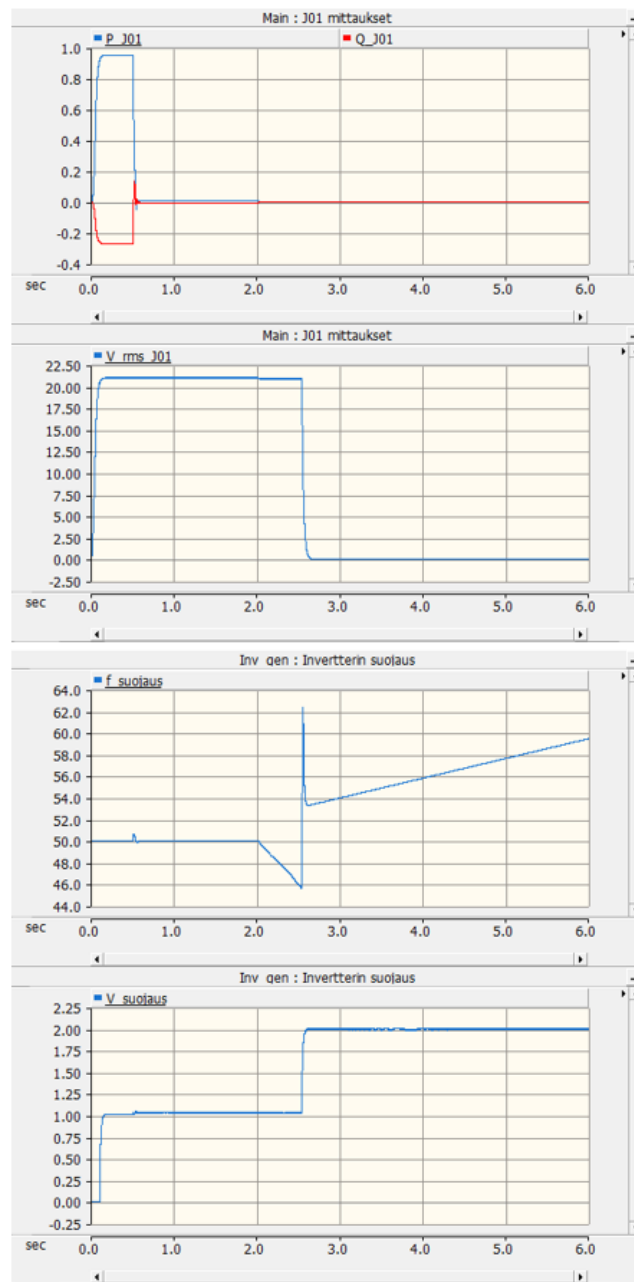
Ilmajohtoverkon simulointitilanne 16



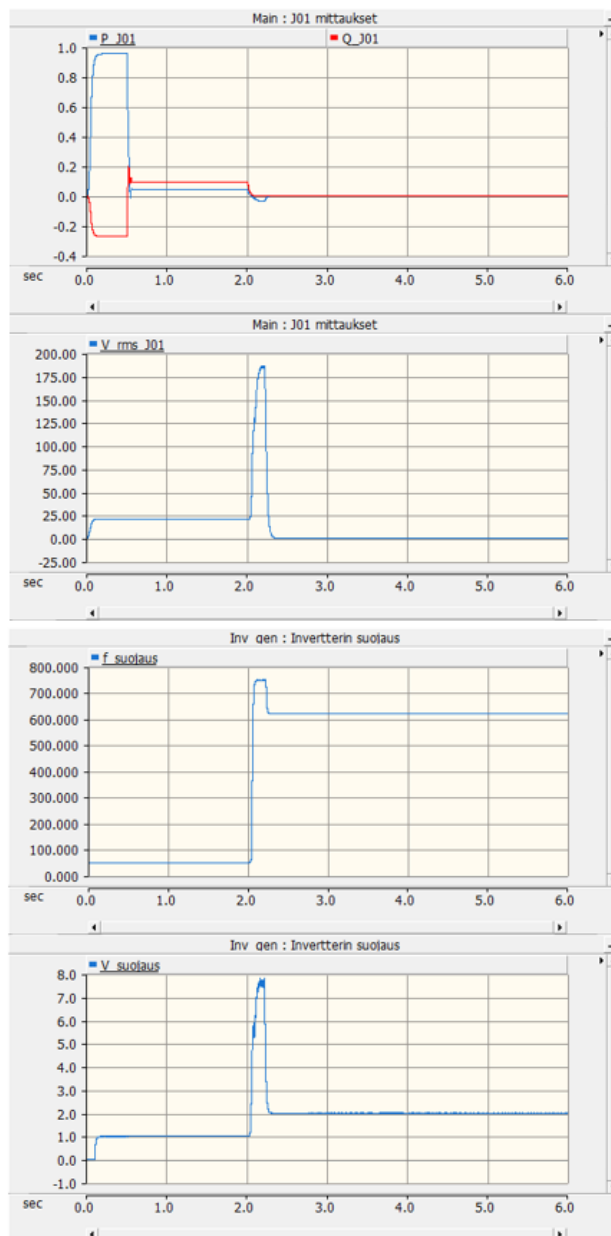
Ilmajohtoverkon simulointitilanne 17



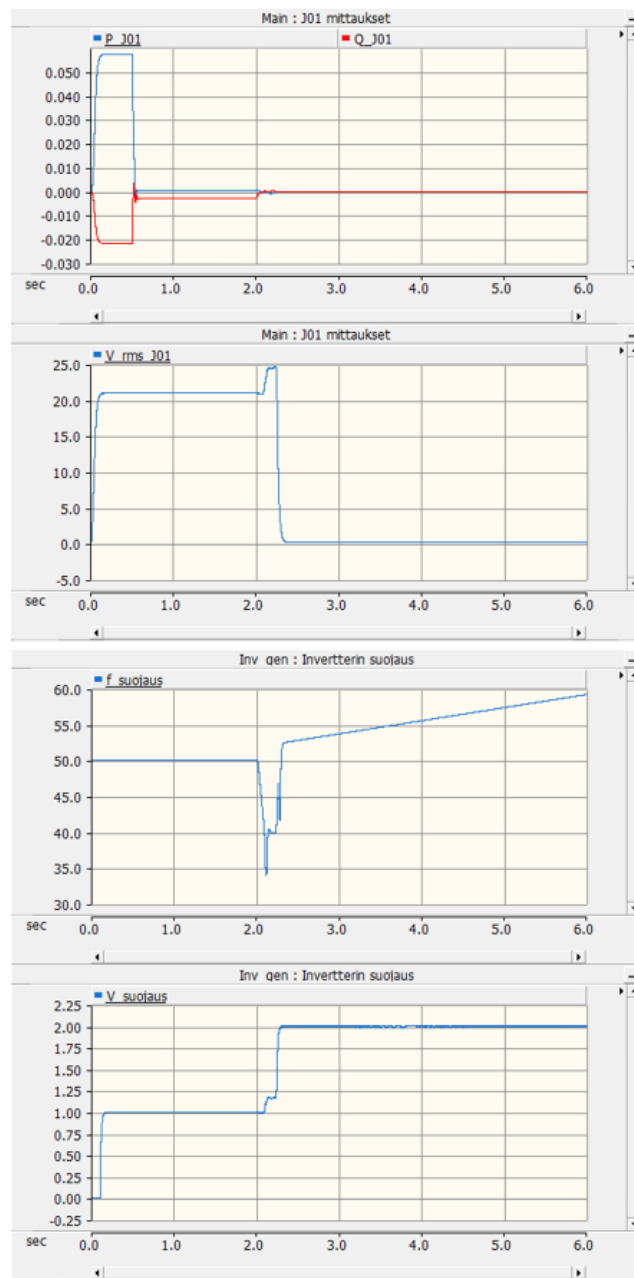
Ilmajohtoverkon simulointitilanne 18



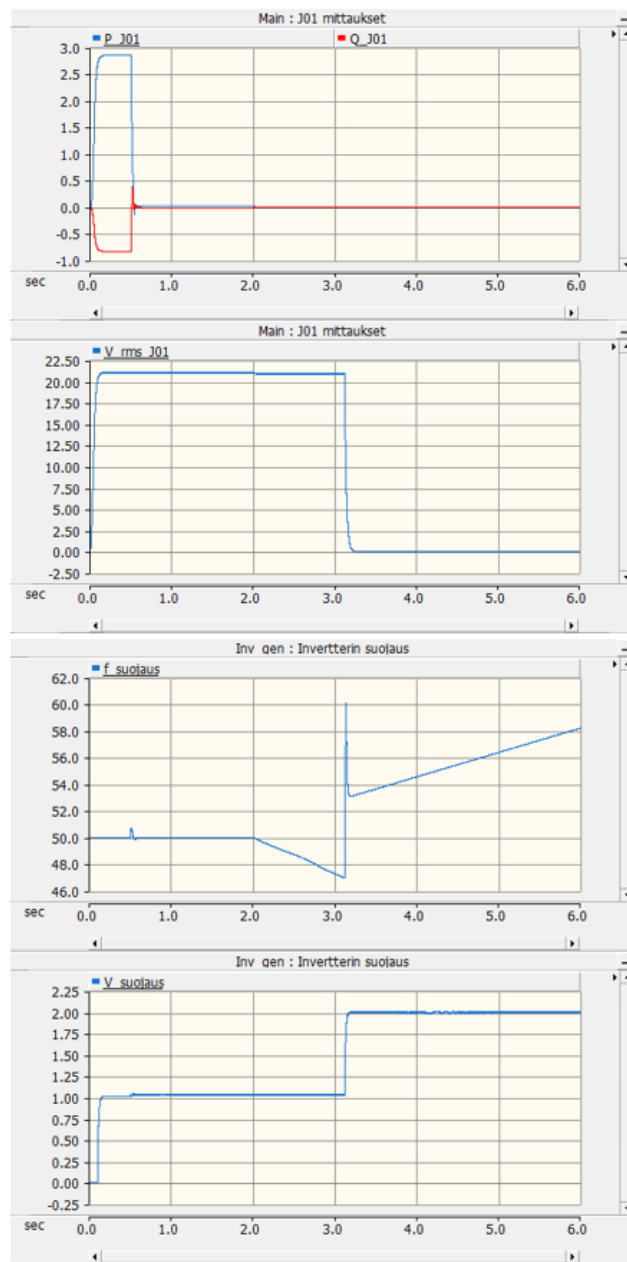
Ilmajohtoverkon simulointitilanne 19



Ilmajohtoverkon simulointitilanne 20

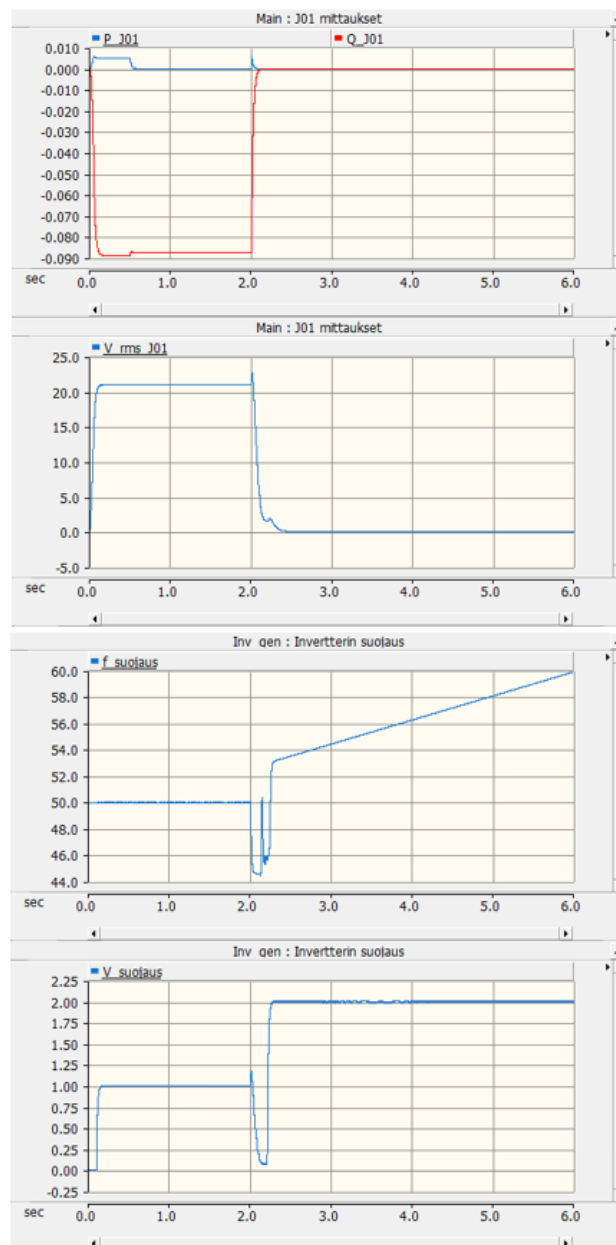


Ilmajohtoverkon simulointitilanne 21

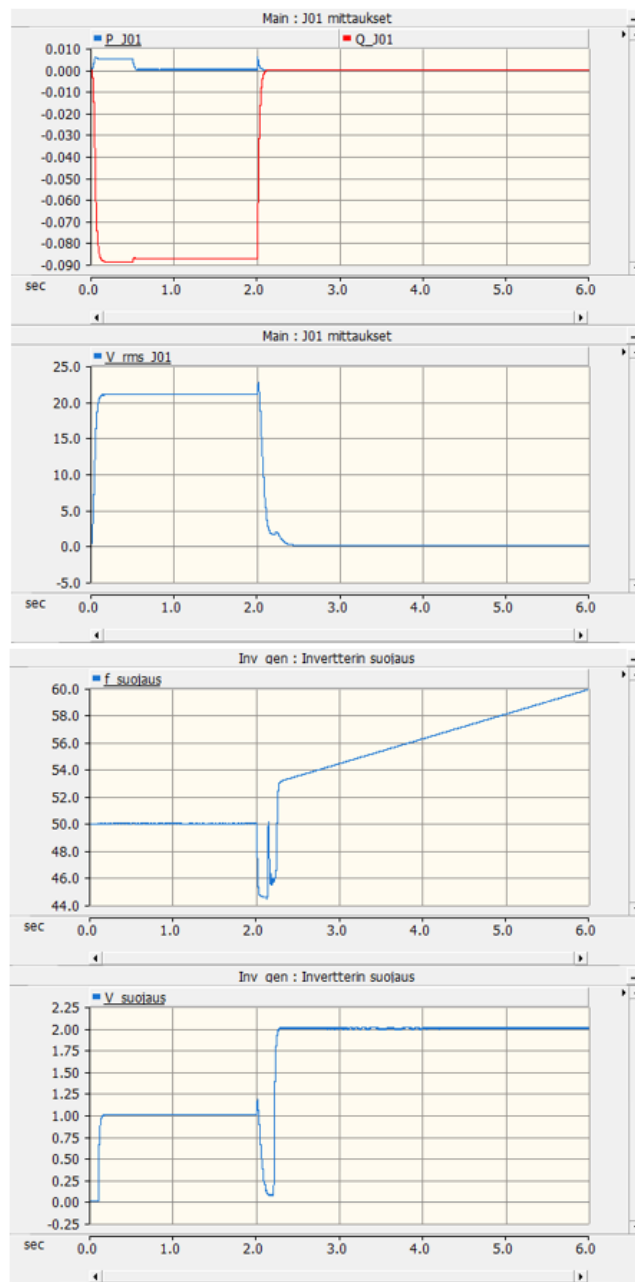


LIITE D: SIMULOINTITULOKSET, MAAKAAPE- LOITU VERKKOMALLI HÄVIÖT HUOMIOI- MATTA

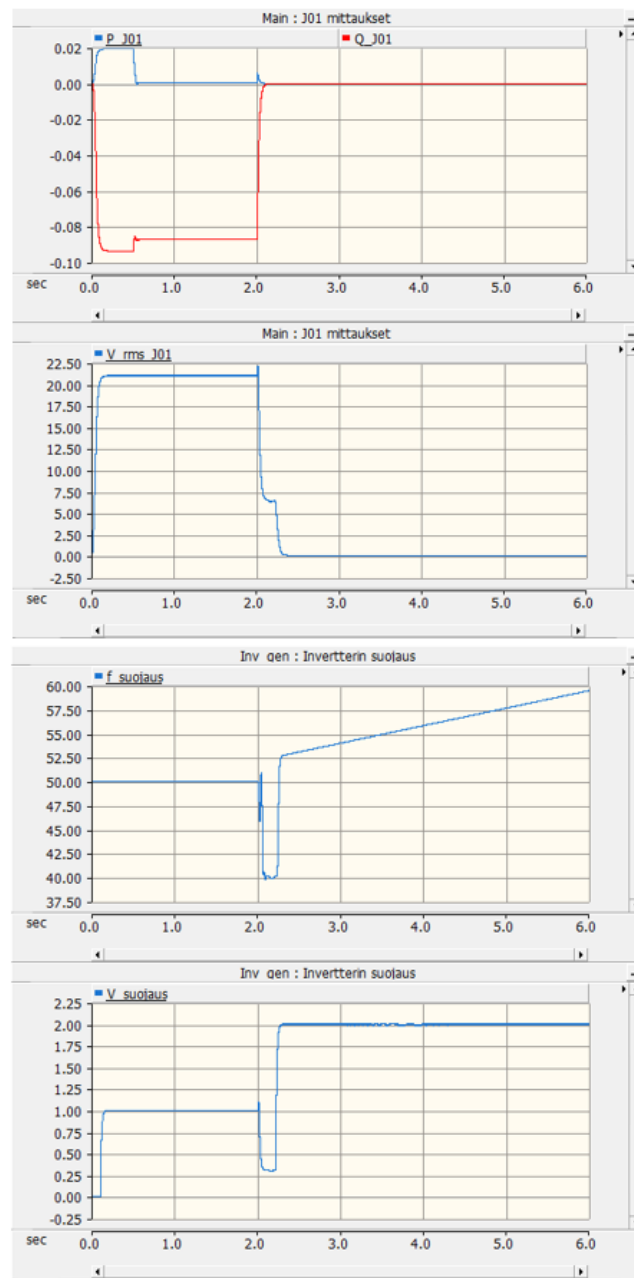
Kaapeliverkon simulointitilanne 22



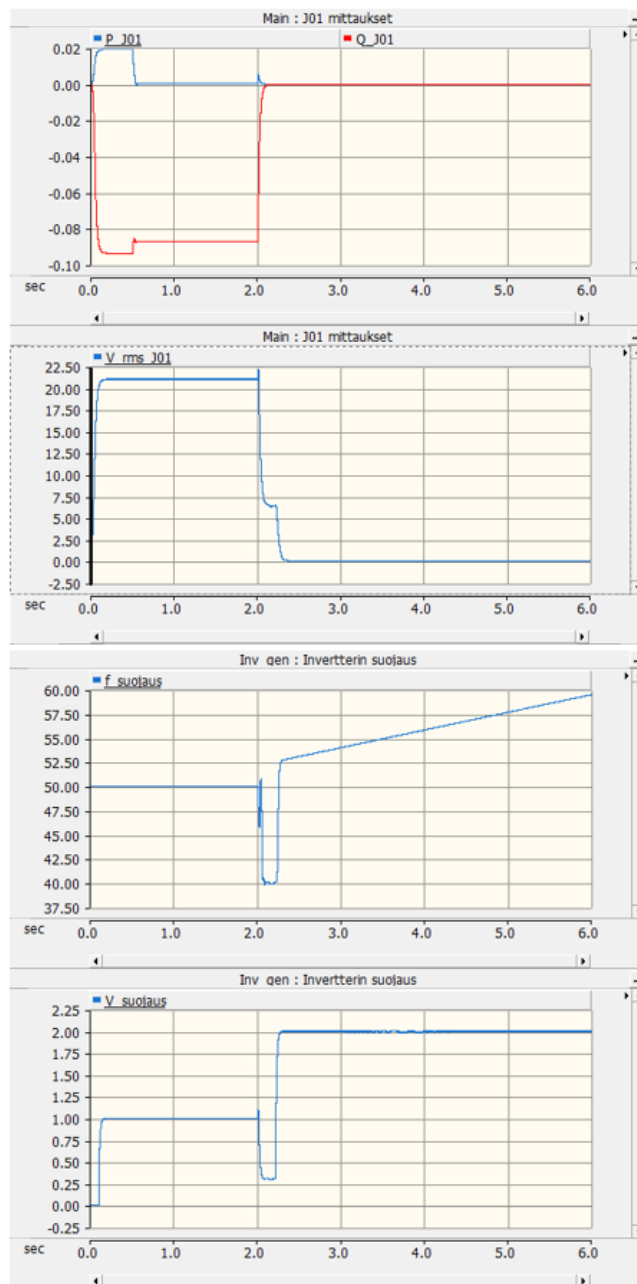
Kaapeliverkon simulointitilanne 23



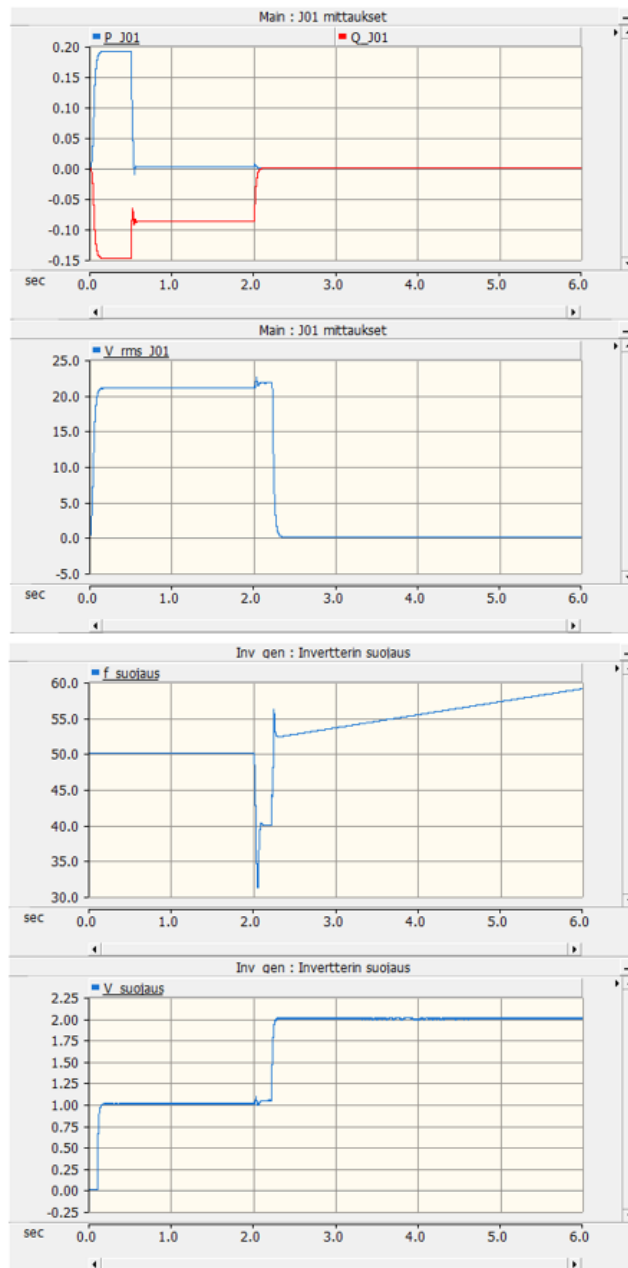
Kaapeliverkon simulointitilanne 24



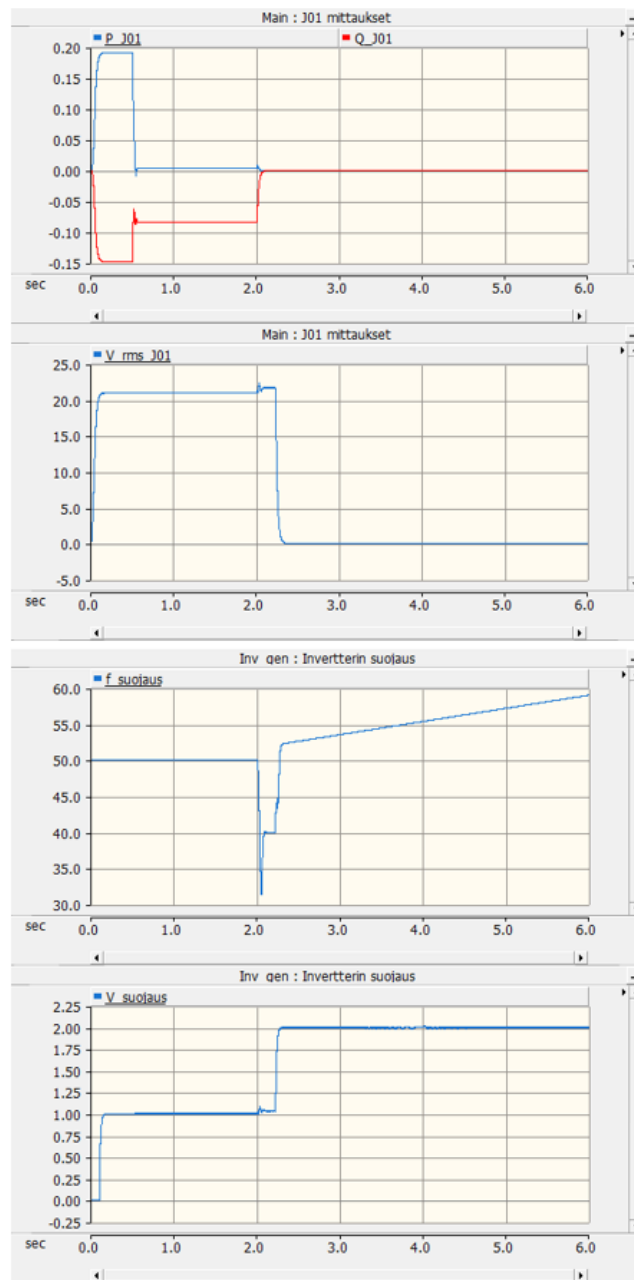
Kaapeliverkon simulointitilanne 25



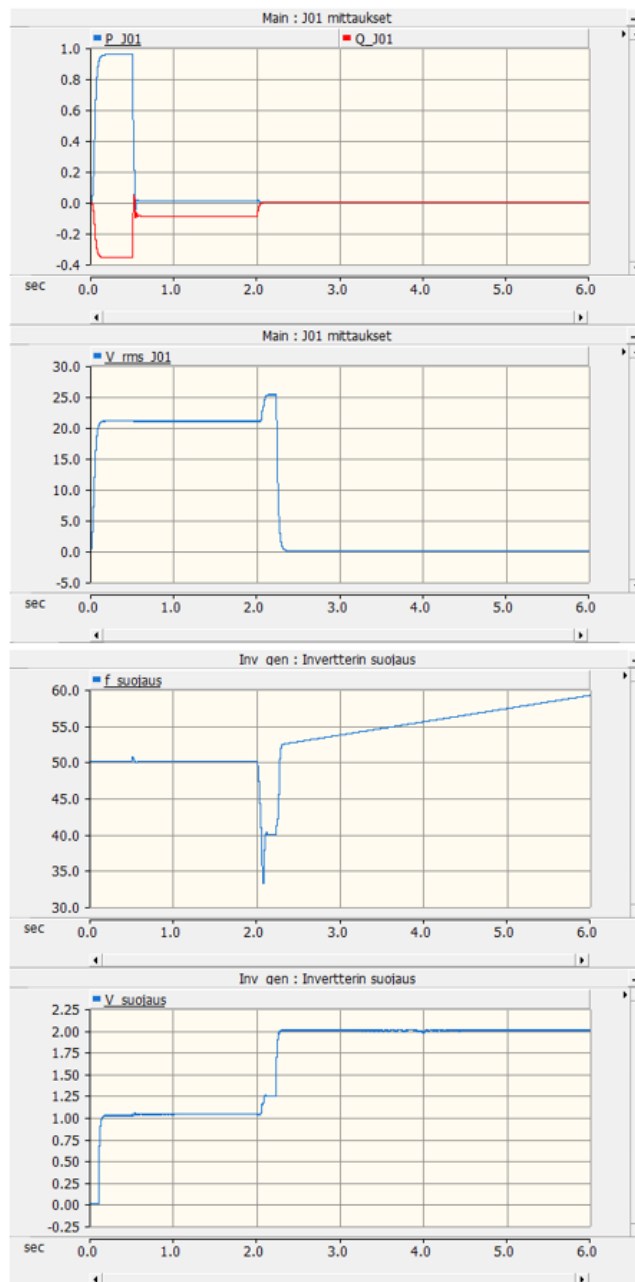
Kaapeliverkon simulointitilanne 26



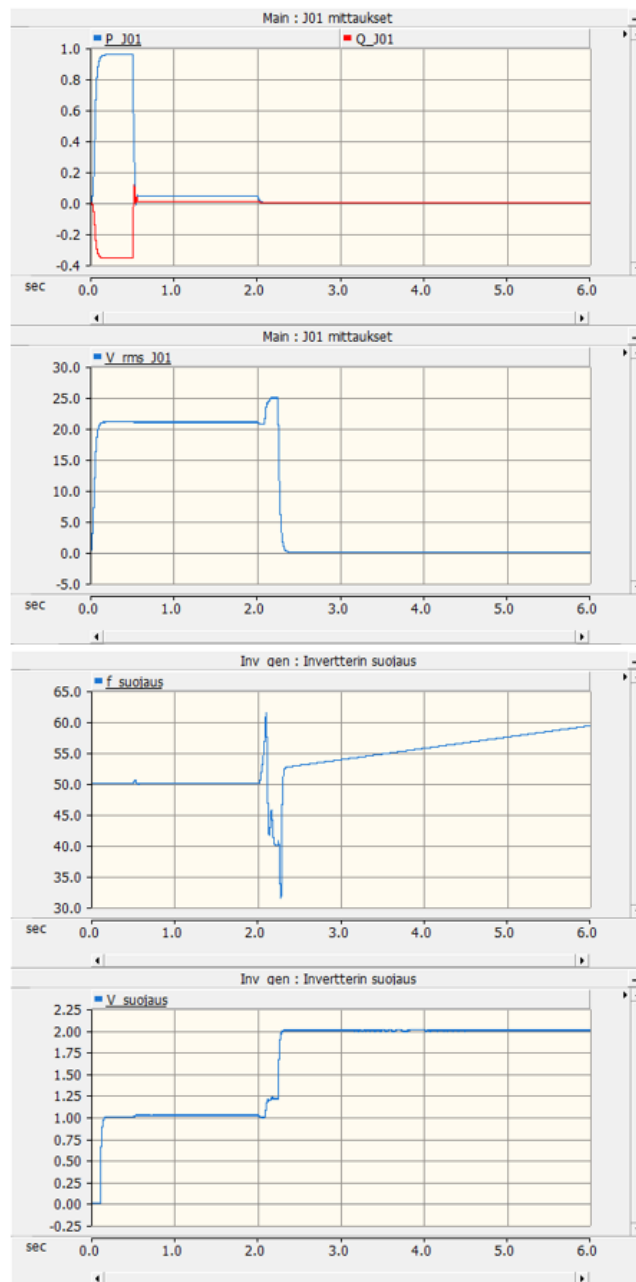
Kaapeliverkon simulointitilanne 27



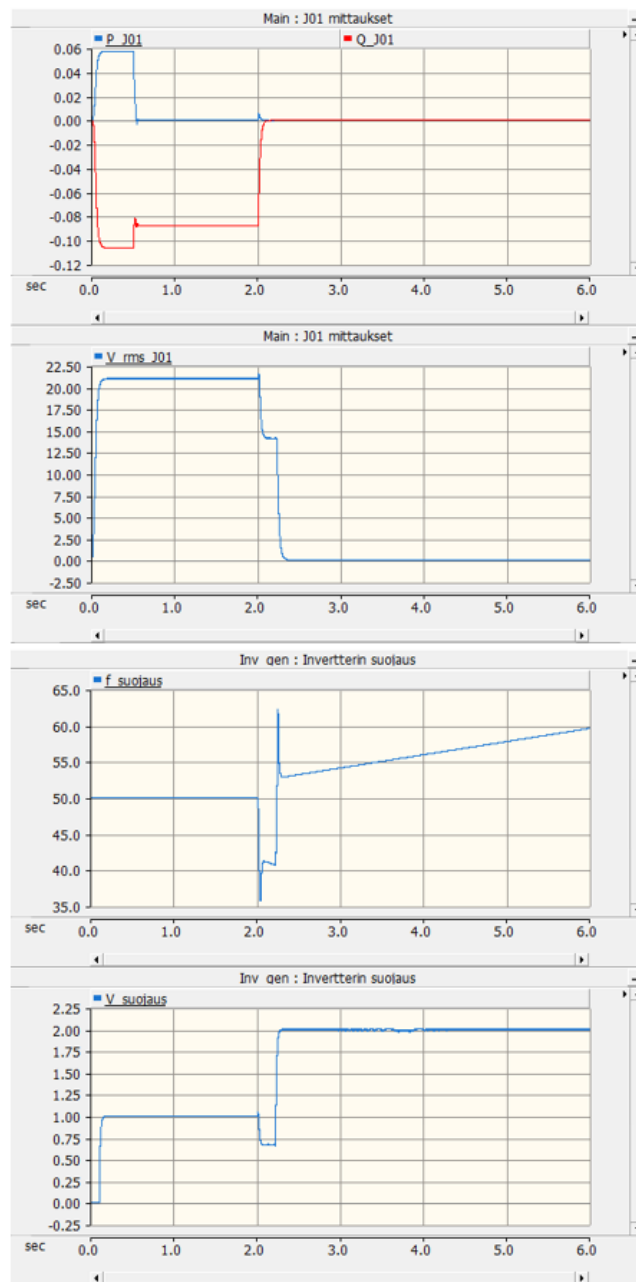
Kaapeliverkon simulointitilanne 28



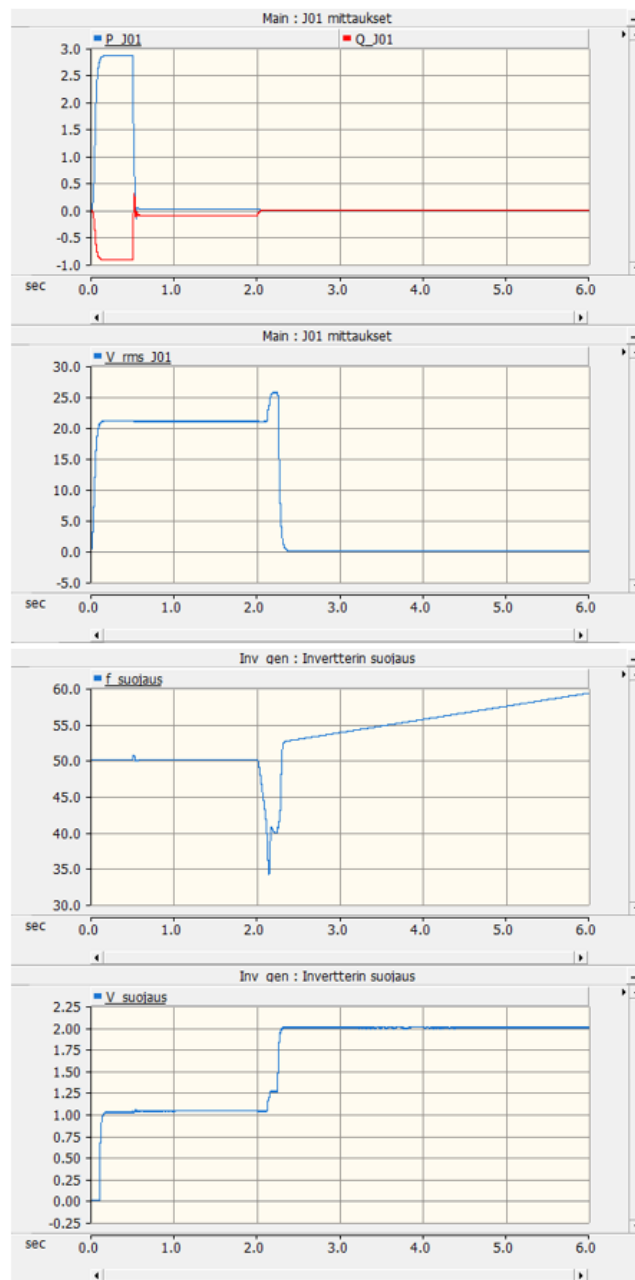
Kaapeliverkon simulointitilanne 29



Kaapeliverkon simulointitilanne 30

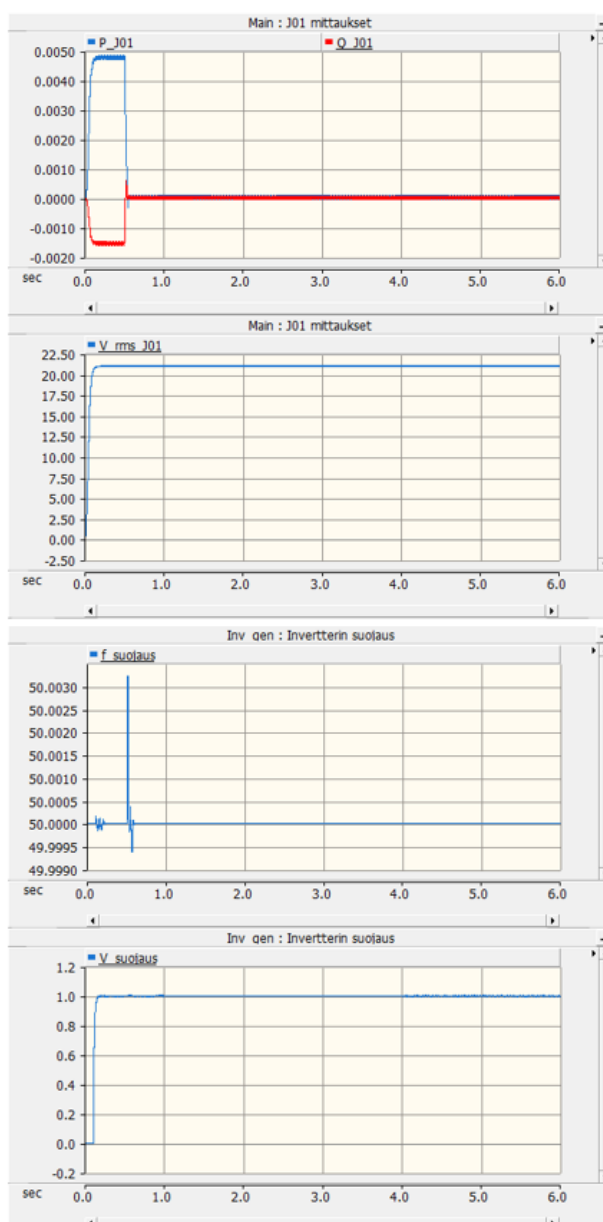


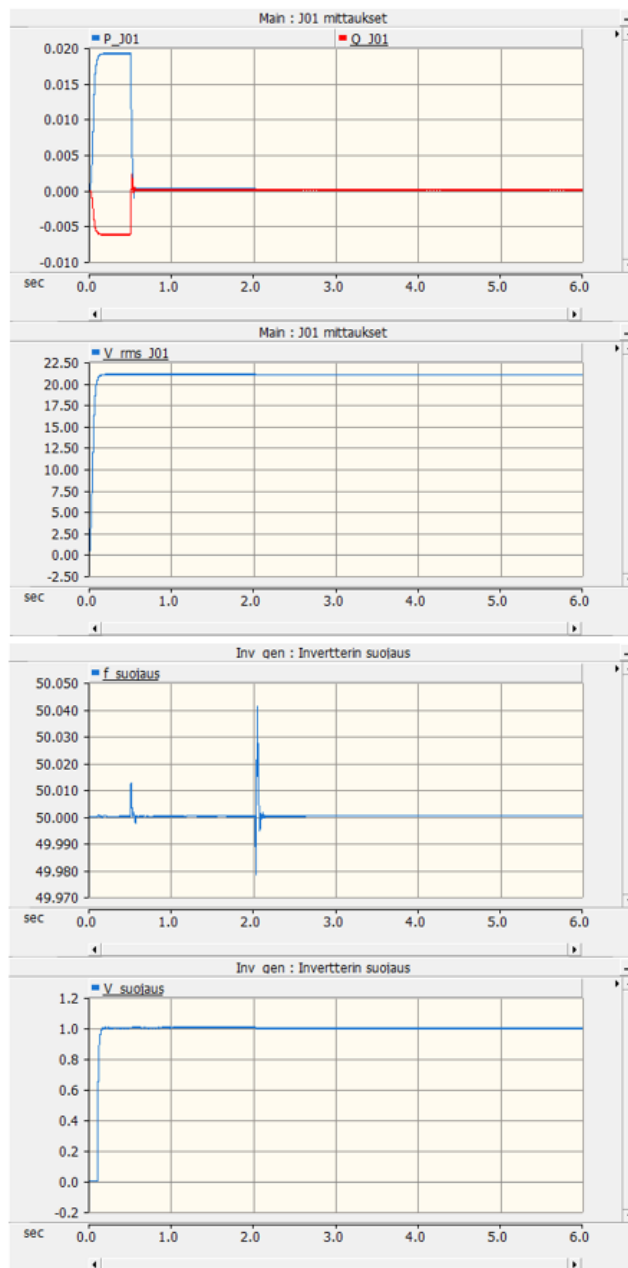
Kaapeliverkon simulointitilanne 31

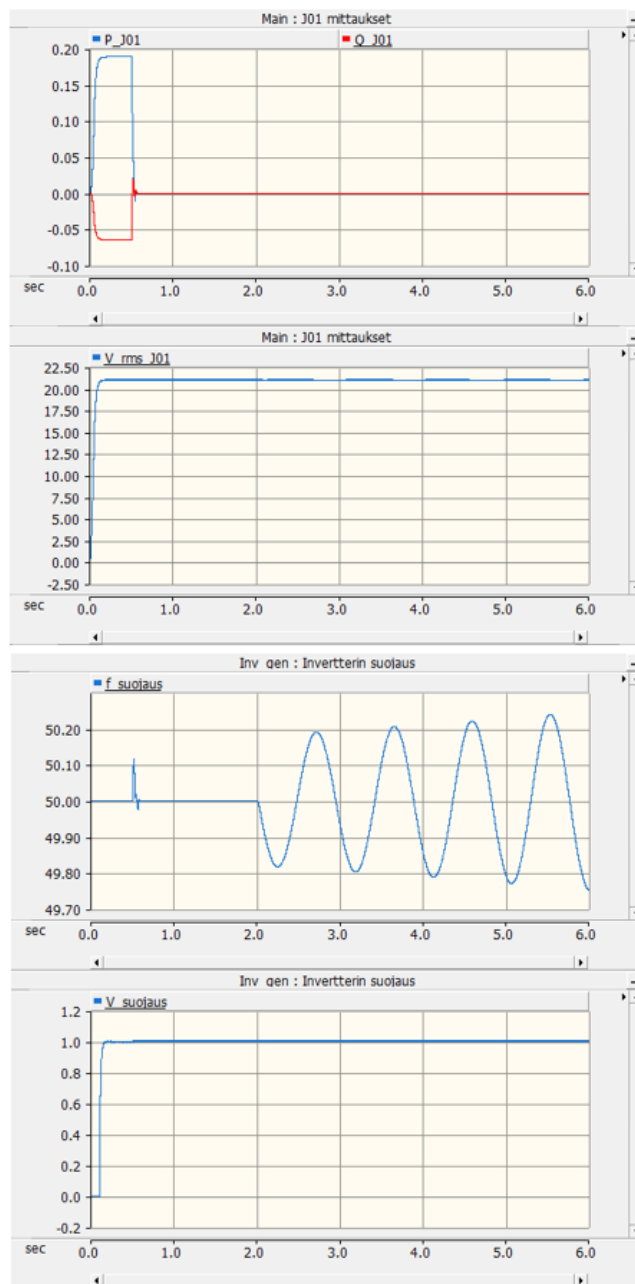


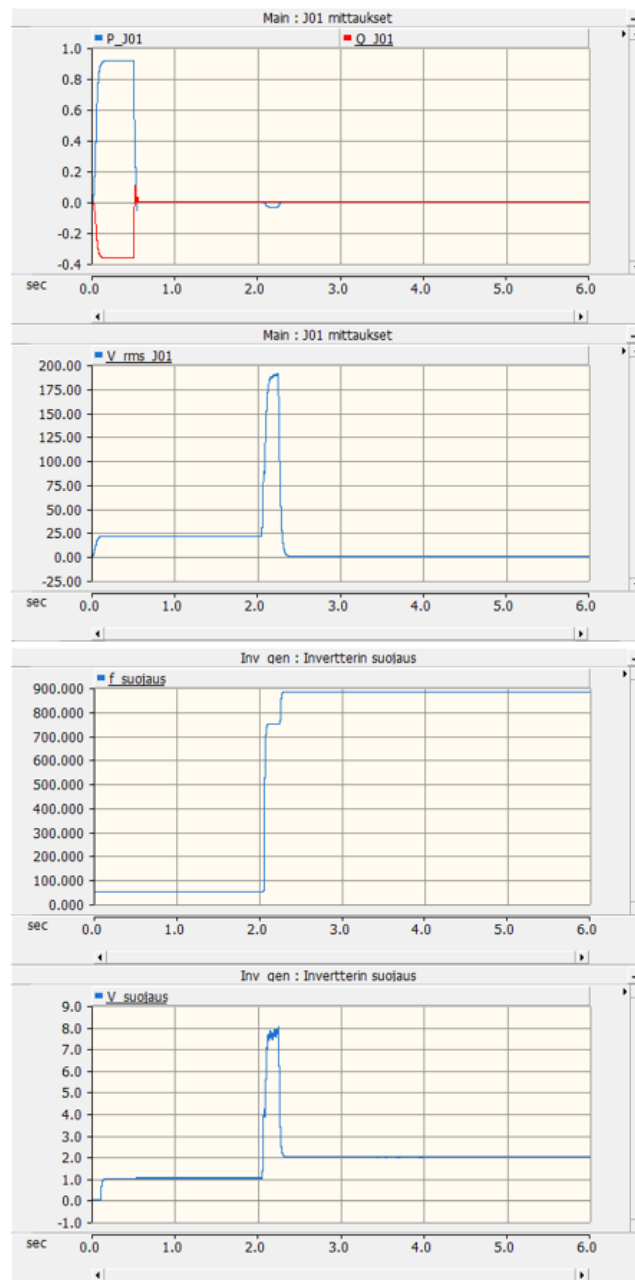
LIITE E: SIMULOINTITULOKSET, MAAKAAPE- LOITU VERKKOMALLI HÄVIÖT HUOMIOI- MATTA

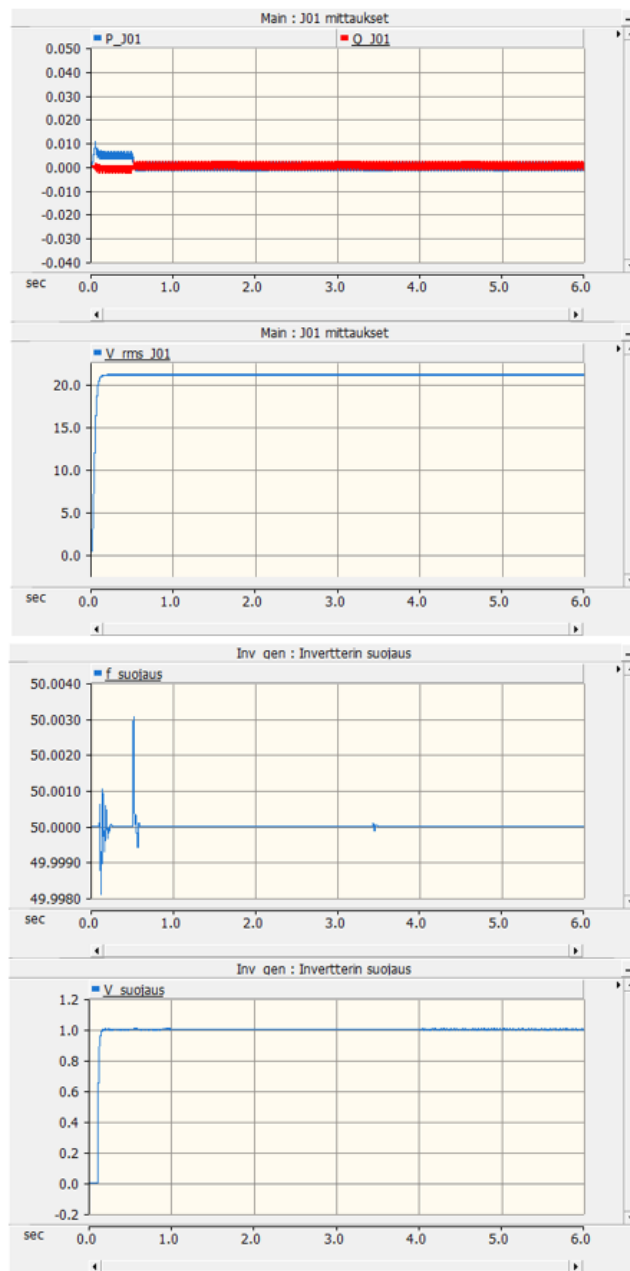
Kompensoidun verkon simulointitilanne 32

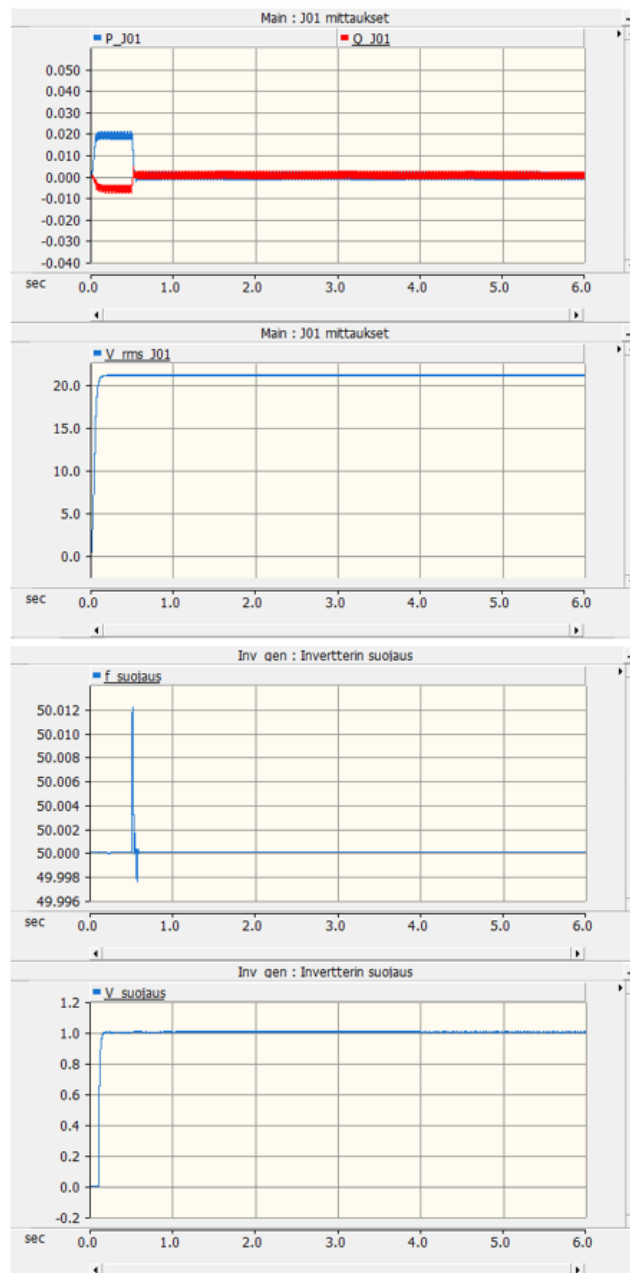


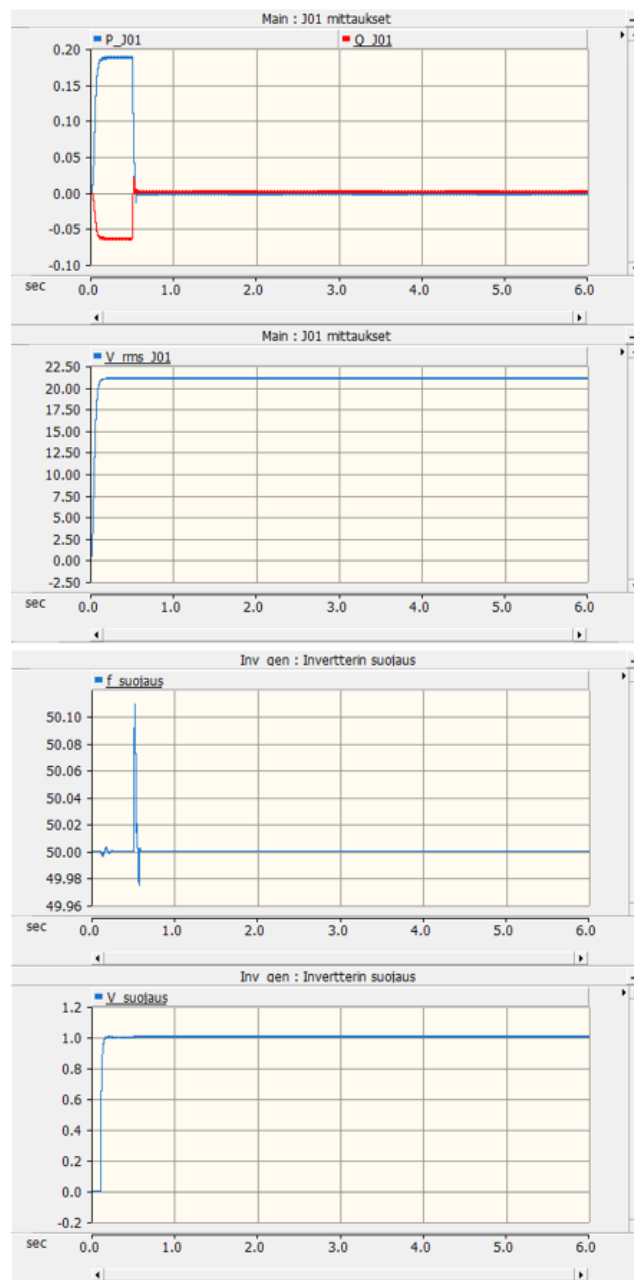
Kompensoidun verkon simulointitilanne 33

Kompensoidun verkon simulointitilanne 34

Kompensoidun verkon simulointitilanne 35

Kompensoidun verkon simulointitilanne 36

Kompensoidun verkon simulointitilanne 37

Kompensoidun verkon simulointitilanne 38

Kompensoidun verkon simulointitilanne 39

